

REVISTA

IPT

Tecnologia
e inovação

06

ipt
INSTITUTO DE
PESQUISAS
TECNOLÓGICAS

Dezembro/2017

MPEs

Aumento da competitividade utilizando ferramenta de gestão da produção

ÍMÃS SINTERIZADOS

Estudo permite produção de geradores eólicos e motores elétricos com melhor desempenho

HABITAÇÕES

Caminhos para aprimorar o método de avaliação de desempenho térmico



REVISTA IPT | Tecnologia e Inovação

v.1, n.6, dezembro, 2017

Quadrimestral

Conselho Editorial

Adriana Camargo de Brito

Alex Fedozzi Vallone

Alexandre Muselli Barbosa

Ana Carolina Carneiro

Célia Aparecida Lino dos Santos

Claudia Echevengúá Teixeira

Cyntia Matteucci

Denis Bruno Virissimo

Gilder Nader

Juliana Lopes Cardoso

Rima Yehia

Conselho técnico administrativo

Edna Baptista dos S. Gubitoso

Zehbour Panossian

ISSN 2526-5830

Copyright© IPT. Todos os direitos reservados. Todos os textos, imagens, gráficos, e outros materiais são protegidos por direitos autorais e outros direitos de propriedade intelectual pertencentes ao IPT. A reprodução dos textos da Revista IPT somente será permitida para fins didáticos e de pesquisa, desde que com a citação deste material. Proibida a reprodução total ou parcial, com intuito de lucro direto ou indireto, por qualquer meio ou processo.

Créditos técnicos

ARTE E DIAGRAMAÇÃO:

Augusto Max Colin

Marina de Almeida Nunes

REVISÃO:

Edna Baptista dos S. Gubitoso

Zehbour Panossian

Av. Prof. Almeida Prado, 532 - Cidade Universitária - Butantã
05508-901 - São Paulo - SP

ISSN 2526-5830

#06

Revista IPT:
Tecnologia
e inovação

Artigos técnicos

SUMÁRIO

p. 06	Aumento da competitividade em pequenas empresas utilizando a ferramenta operacional GESPRO
p. 13	Avaliação de desempenho térmico de habitações segundo a Norma ABNT NBR 15575: aspectos a aprimorar
p. 21	Avaliação de desempenho térmico de habitações segundo a norma ABNT NBR 15575: proposta para aprimoramento do método simplificado
p. 34	Avaliação de desempenho térmico de habitações segundo a Norma ABNT NBR 15575: proposta para aprimoramento do método detalhado
p. 60	Estudo da microestrutura de solidificação em função da taxa de resfriamento de ligas Nd-Fe-B para ímãs sinterizados
p. 78	<i>Evaluation of non-intrusive systems for internal corrosion monitoring</i>

EDITORIAL



Fernando José Gomes Landgraf
Diretor presidente do IPT

Esta, que é a sexta edição da 'Revista IPT, Tecnologia e Inovação', reúne seis artigos técnicos selecionados, de autoria de pesquisadores do Instituto. Apresentam diferentes abordagens com foco em inovação. É o IPT compartilhando o conhecimento tecnológico que produz.

O primeiro artigo desta série, intitulado "Aumento da competitividade em pequenas empresas utilizando a ferramenta operacional GESPRO", leva em conta os percentuais de mortalidade de empresas, principalmente as micro e pequenas, no Brasil. O Núcleo de Apoio Tecnológico às Micro e Pequenas Empresas, por meio da ferramenta Gestão da Produção – GESPRO, procura melhorar o desempenho empresarial com a identificação de 'gargalos' e possíveis soluções para cada problema.

No segundo artigo, sob o título "Avaliação de desempenho térmico de habitações segundo a Norma ABNT NBR 15575: aspectos a aprimorar", pesquisadores do Centro Tecnológico do Ambiente Construído analisam aspectos relacionados ao bem-estar de usuários em uma unidade habitacional. Discutem problemas identificados nos métodos de avaliação da Norma em questão, que é hoje a principal referência para avaliar sistemas construtivos no âmbito do Sistema Nacional de Avaliações Técnicas (SINAT). Os resultados orientam análises para concessão de financiamentos imobiliários.

Na sequência apresenta-se artigo intitulado "Avaliação de desempenho térmico de habitações segundo a Norma ABNT NBR 15575: proposta para aprimoramento do método simplificado". Contém sugestões em prol do método simplificado da referida norma que é a principal referência, atualmente, para avaliar sistemas construtivos no âmbito do Sistema Nacional de Avaliações Técnicas (SINAT).

"Estudo da microestrutura de solidificação em função da taxa de resfriamento de ligas Nd-Fe-B para ímãs sinterizados" é o título do artigo de pesquisadores do Centro de Tecnologia em Metalurgia e Materiais e da Poli/USP. O experimento de solidificação da liga foi feito em forno de indução a vácuo, com atmosfera de argônio. O objetivo foi avaliar o efeito da taxa de resfriamento na microestrutura de solidificação. A análise química mostrou que a perda de neodímio por evaporação é baixa.

O artigo "Avaliação de desempenho térmico de habitações segundo a Norma ABNT NBR 15575: proposta para aprimoramento do método detalhado", do grupo de pesquisadores do Centro Tecnológico do Ambiente Construído. Avança nas sugestões para aprimoramento do método detalhado de avaliação do desempenho térmico de habitações, segundo a já referida Norma ABNT, empregada no âmbito do SINAT.

Fecha com chave de ouro esta edição o artigo "Evaluation of non-intrusive systems for internal corrosion monitoring", produzido numa parceria entre pesquisadores do Laboratório de Corrosão e Proteção do IPT e do Cenpes/Petrobras. Ponto de partida é a constatação de que a corrosão interna é um dos principais problemas que afetam a integridade de dutos e dos equipamentos de processo. Assim o monitoramento da corrosão interna torna-se essencial para antecipar-se a processos corrosivos.

Aumento da competitividade em pequenas empresas utilizando a ferramenta operacional GESPRO

Competitiveness improvement of small enterprises employing GESPRO Program

Mari Tomita Katayama^a, Henrique Jun Muramatsu Seguchi^b, Djair Vitoruzzo^a, João Carlos Martins Coelho^c

^a NT-MPE - Núcleo de Atendimento Tecnológico à Micro e Pequena Empresa, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A., São Paulo-SP, Brasil.

^b Fundação de Apoio ao IPT, São Paulo-SP, Brasil.

^c Instituto Mauá de Tecnologia, São Caetano do Sul-SP, Brasil

*E-mail: katayama@ipt.br

Palavras-chave:
gestão da produção; MPE;
produtividade.

Keywords:
production management;
micro and small enterprises;
productivity.

Resumo

O cenário nacional é constituído por altos percentuais de mortalidade de empresas, principalmente as micro e pequenas empresas, que nem sempre possuem recursos humanos com conhecimento técnico e de gestão necessários. O Núcleo de Apoio Tecnológico às Micro e Pequenas Empresas, por meio da ferramenta Gestão da Produção - GESPRO, busca contribuir no sentido de melhorar o processo de gestão da produção das empresas, mediante a identificação e a proposição de soluções de problemas tais como: gargalos existentes no processo produtivo, gestão de materiais, determinação adequada de custos de produção, *layout* inadequado, planejamento, programação e controle da produção e outros. Neste artigo, é apresentada a metodologia de trabalho da ferramenta GESPRO e a sua aplicação numa empresa que fabrica e comercializa sistema de envase e aplicação de selos de proteção em embalagens plásticas rígidas, para a indústria de alimentos, cosméticos, produtos químicos e farmacêuticos e a apresentação dos resultados obtidos.

Abstract

The national scenario is comprised of high corporate mortality rates, especially for micro and small companies which do not always have the human resources with the necessary technical knowledge and management skills. The Technological Support Center for Micro and Small Companies of IPT, through the Production Management Program - GESPRO, aims at contributing to improve the process of production management of companies, by identifying and proposing solutions to problems such as: bottleneck of the production processes, material management; proper production cost assessment; inadequate layout;

planning; scheduling and production control and others. This paper presents the work methodology of GESPRO and its application in a company that manufactures and markets packaging systems and rigid-plastic packaging sealers for food, cosmetics, chemical and pharmaceutical industries. The obtained results were also presented.

1 Introdução

Os serviços prestados pelo Núcleo de apoio Tecnológico às Micro e Pequenas Empresas (NT MPE), do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A. (IPT), por meio de ações de extensão tecnológica e de desenvolvimento tecnológico, geralmente, possuem subsídio financeiro parcial não reembolsável, cabendo à empresa atendida uma contrapartida que corresponde a uma parcela do valor total do atendimento. Esse subsídio provém de duas fontes: recurso federal, por meio do Sistema Brasileiro de Tecnologia (SIBRATEC), fomentada pela Financiadora de Estudos e Projetos do Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações (FINEP/MCTIC) e recurso estadual por meio do orçamento anual do Estado, por meio do Programa de Apoio Tecnológico às Micro, Pequenas e Médias Empresas.

Para as empresas poderem usufruir do subsídio financeiro, elas precisam ser classificadas como micro, pequenas e médias empresas (MPMEs) e faturar abaixo de R\$ 90.000.000,00 por ano. As modalidades de atendimento do NT-MPE, que contemplam parcialmente o subsídio financeiro, são: Projeto Unidades Móveis (PRUMO), Programa de Apoio Tecnológico à Exportação (PROGEX), Qualificação técnica de produtos, visando o Mercado Interno (QUALIMINT), Produção mais Limpa (PROLIMP) e a Gestão da Produção (GESPRO), sendo essa última o objeto deste estudo. A contrapartida a ser paga pela empresa é orçada caso a caso, conforme a complexidade do problema a ser resolvido.

O apoio do NT-MPE é importante para solucionar os problemas tecnológicos de micro, pequenas e médias empresas, tendo em vista que nem sempre elas possuem recursos financeiros e humanos com conhecimentos técnicos das ferramentas de gestão, que são requisitos fundamentais para continuarem em um mercado que tem se mostrado cada vez mais competitivo. De acordo com o Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas (2016), a taxa de sobrevivência das empresas com dois anos de atividade, no ano de 2012, foi pouco maior do que 75 %, ou seja, de cada quatro empresas abertas no período, uma acabou fechando as portas.

Segundo a Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (2002 apud LEITE FILHO; FIGUEIRÓ, 2009) uma das razões para a descontinuidade operacional das empresas é constituída por problemas ligados à gestão, isto é, a maneira como a empresa como um todo é gerenciada ou administrada. Neste contexto, ressalta-se uma particularidade que é a gestão da produção, a qual tem como foco central a fabricação de produtos com qualidade, nos prazos estabelecidos e ao menor custo possível (MARQUES, 2012).

Neste cenário, constituído por altos percentuais de mortalidade de empresas, o IPT, por meio do seu NT MPE, desenvolveu uma modalidade específica de atendimento denominada Gestão da Produção. Essa ferramenta operacional, desenvolvida pelo IPT, tem como foco fundamental contribuir para melhorar o processo de gestão da produção das empresas, por meio da identificação e proposição de soluções de problemas reais da empresa, tais como: gargalos existentes no processo produtivo, gestão de materiais, alocação correta de custos de produção, *layout* inadequado, planejamento, programação e controle da produção (PPCP) inoperante e outros. De maneira geral, essa ferramenta facilita o desenvolvimento de ações que melhoram o processo produtivo da empresa, ressaltando-se que essa modalidade de atendimento foi implantada em 2005 e, desde então, foram atendidas mais de 150 pequenas e médias empresas do Estado de São Paulo, dos mais diferentes setores.

A modalidade de atendimento GESPRO utiliza os princípios da *lean manufacturing*, que objetiva a redução de desperdícios, eliminando, por exemplo, excesso de processamento, otimizando estoques, etc. (OHNO, 1997), com aplicação das ferramentas da gestão de produção, tais como o *Just in Time* (JIT), *Kanban*, *Total Productive Maintenance* (TPM), *Heijunka*, *kaizen* etc.

O sucesso da implantação de sugestões de melhorias propostas pela equipe de GESPRO está relacionado com o foco no problema real da empresa e pelo total empenho da direção da empresa. Eventualmente podem ser enfrentadas resistências a mudanças por parte dos colaboradores da empresa, no entanto, essas resistências podem ser contornadas, em parte pela direção da empresa, e pelas ações de melhorias, envolvendo as lideranças dos diferentes setores da empresa.

Nota-se que as tratativas com o cliente são iniciadas em um primeiro contato entre IPT e empresa no qual é apresentado o funcionamento, foco e os requisitos para receber o atendimento com subsídio financeiro parcial do programa. Nesse contato, é feito o levantamento preliminar da necessidade do cliente, são coletadas algumas informações julgadas importantes e a manifestação do cliente quanto à intenção em participar ou não do Programa.

2 Procedimento metodológico

Os atendimentos são divididos em duas fases. A primeira é chamada de fase de diagnóstico do produto e do processo, com a finalidade de identificar, elencar, diagnosticar e apontar parâmetros ou indicadores para avaliação pré e pós-ações gerenciais e técnicas sobre o sistema produtivo do tema-objeto. Os procedimentos adotados nesta primeira fase são:

- a. visita à Empresa, para conhecimento de todo o processo industrial de fabricação do produto objeto, quando:
 - são observadas e identificadas as linhas/produtos/metodologias que necessitem de atendimento;
 - são identificados problemas a serem superados, a partir da própria visão do profissional do IPT e da postura do empresário frente a eventuais necessidades, tais como investimentos em máquinas e equipamentos, investimentos em alteração de *layout* etc., para que as proposições de melhorias e suas implantações ocorram de forma a obter maiores ganhos;
 - é realizada a escolha, em comum acordo com a direção da empresa, de um ou, no máximo, dois problemas a serem solucionados, tendo em vista que a abordagem de mais do que dois problemas leva a extrapolar tanto os prazos típicos de aplicação do GESPRO quanto os seus custos; e
 - é definido o escopo do trabalho de forma transparente, bem como o problema a ser superado;
- b. elaboração de orçamento, com a ciência e acordo por parte do empresário, do trabalho que será executado, nas condições preliminarmente apresentadas. Após o orçamento ser aprovado, os trabalhos são iniciados por meio da criação de um plano de ação que premia a abordagem do problema, com aplicação das ferramentas de gestão de produção.

A segunda fase é aquela na qual é realizada a implantação técnica das proposições e correções, a partir do plano de ação anteriormente definido. Então, são feitas as recomendações, sugestões de melhorias e acompanhamento da implantação das ações. As proposições de melhorias são sempre apoiadas nos fundamentos teóricos de engenharia, que constituem as ferramentas tradicionais de gestão da produção com aplicação direta no problema ou necessidade da empresa, procurando obter, quando executadas, ganhos de produtividade e/ou de redução de custos. Ainda nessa fase, é realizado o acompanhamento das atividades desenvolvidas pela empresa com prestação de assessorias, quando cabíveis e necessárias. Esse acompanhamento é presencial e limitado aos prazos contratuais.

A duração do atendimento, em média, é de quatro meses a seis meses, podendo variar de acordo com a complexidade do problema e do tempo de resposta que as empresas requerem para conduzir as ações necessárias sugeridas pela equipe do IPT.

3 Estudo de caso

Uma empresa, que fabrica e comercializa equipamentos destinados ao envase e aplicação de selos de proteção em embalagens plásticas rígidas (copos, potes, garrafas, bandejas, baldes, galões e tambores) buscou apoio junto ao NT-MPE do IPT para melhorar a gestão do seu processo produtivo, que envolvia tanto o projeto específico dos produtos para a aplicação desejada, quanto a sua fabricação. Nesse caso em particular, a empresa, que atende as indústrias de alimentos, cosméticos, produtos químicos e farmacêuticos tinha prazo de entrega que chegava a até 180 dias, considerado pela empresa excessivamente longo, o qual se desejava reduzir.

Na primeira fase do atendimento, foi realizada a visita à empresa para entender o funcionamento de todo o processo industrial. Ainda nesta fase, por meio de visitas adicionais, foi feito o diagnóstico e levantamento de informações necessárias. Com isso, estabeleceu-se como foco o aprimoramento do planejamento de produção e materiais, para redução de prazo e aumento da pontualidade nas entregas. Foram formatadas ferramentas para auxiliar no controle de previsão dos prazos, na melhoria da comunicação, no remanejamento de prioridades, na tomada de decisões sobre prazos e também de forma a assegurar uma administração aprimorada de todos os pedidos conhecidos e dos recursos empregados, conforme necessidade exposta em reunião pelo corpo técnico e gerencial da empresa.

4 Resultados e discussão

Tendo a proposição inicial em foco, após análise do fluxo produtivo, foram identificados:

- a. a necessidade de elaborar um novo fluxograma operacional da empresa que mostrasse as principais etapas e atividades, pois o atual não representava a realidade;
- b. o baixo controle nos prazos de entrega; e
- c. a falta de sincronização entre as diferentes etapas ou setores.

A partir desta verificação inicial, o trabalho do IPT consistiu no aprimoramento do planejamento de produção e gestão de materiais para o aumento da pontualidade nas entregas. Assim, em sequência, foram realizados os trabalhos da segunda fase, por meio da condução das seguintes atividades:

- a. revisão do fluxograma operacional da empresa;
- b. desenvolvimento de procedimento de contato do Setor de Projetos e Instalação com os clientes;
- c. desenvolvimento de cronograma de ações, retrocedendo a partir da data prevista de entrega até a data prevista de início dos processos fabris;
- d. levantamento do mapa de capacitações dos colaboradores;
- e. análise do processo de usinagem e montagem de peças; e
- f. implantação de kanban para facilitar o controle de estoque, estabelecendo quantidades máximas e mínimas de componentes de baixo custo.

Com respeito a essas atividades, tem-se a comentar:

- a. o fluxograma operacional da empresa foi revisto;
- b. as limitações nos contatos entre o Setor de Projetos e os clientes impediam o esclarecimento adequado de aspectos técnicos que, por sua vez, acarretavam em falta de precisão nas especificações registradas nas Ordens de Serviço, que no processo produtivo causavam baixa eficiência operacional;
- c. o desenvolvimento do cronograma de ações, que, partindo da data prevista de entrega, permitiu:
 - estabelecer sincronização entre as diferentes etapas do processo produtivo e entre atividades de diversos setores;
 - analisar a demanda frente à capacidade de execução facilitando a detecção de possíveis atrasos;
 - estabelecer junto aos fornecedores, os prazos para a entrega dos materiais adquiridos para a produção; e
 - facilitar a acomodação de pedidos urgentes, os quais, por sua vez, poderão gerar atrasos nos processos fabris de outros produtos.
- d. o Mapa de Capacitações foi elaborado para documentar a capacidade de cada colaborador em executar atividades necessárias para a Empresa, com o objetivo de verificar quais capacitações deveriam ser expandidas e auxiliar na definição de remanejamento de pessoal, concessão de férias e também na especificação de requisitos para novas contratações;
- e. a análise do processo de usinagem e montagem de peças resultou na proposição de critérios de priorização dos serviços de usinagem, buscando-se estabelecer a ordem de produção das peças, além de se determinar a necessidade de os projetistas orientarem cuidadosamente os profissionais responsáveis pela montagem, reduzindo erros e retrabalhos; e
- f. a implantação de *kanban* para facilitar o controle de estoque resultou na redução de perdas de tempo e de atrasos causados pela falta de elementos/componentes de baixo custo. Os colaboradores participaram da implantação do *kanban* e entenderam o motivo da implantação desta ferramenta, para que os materiais tenham maior disponibilidade.

Posteriormente ao trabalho concluído, foi realizada avaliação do atendimento presencialmente, com uso de questionário, por empresa terceirizada, devidamente licitada.

No questionário, a empresa informou que o trabalho realizado pela equipe do IPT, em período de quatro meses, de 07.04.2016 a 10.08.2016 após a aprovação do orçamento, resultou em aumento de produtividade e o prazo de entrega médio foi reduzido em 20 %, isto é, o tempo médio de projeto e fabricação dos equipamentos passou de 180 dias para aproximadamente 144 dias.

Aliam-se a essa redução de prazo uma melhor administração do fluxo produtivo, estando caracterizada a ocorrência de inovação incremental (ORGANIZAÇÃO PARA A COOPERAÇÃO E DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO, 2006), pelo fato de terem sido introduzidos novos métodos de produção, levando a Empresa a se posicionar com maior competitividade no mercado.

5 Conclusões

O serviço realizado pelo NT-MPE do IPT, utilizando-se da ferramenta GESPRO, contribui para o aprimoramento da gestão do processo produtivo de empresas, como foi exposto no estudo de caso.

As MPEs de diferentes segmentos podem se beneficiar do apoio do IPT, utilizando subsídio financeiro parcial não reembolsável, melhorando aspectos da gestão da produção, propiciando melhores controles, redução de custos e aumento de produtividade.

6 Referências

LEITE FILHO, F. A.; FIGUEIRÓ, A. F. G. Fatores que determinam a descontinuidade das empresas: um estudo sob o ponto de vista dos contatos na cidade de Montes Claros (MG). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CUSTOS, 16., 2009, Fortaleza. **Anais eletrônicos...** Fortaleza: ABC, 2009. Disponível em: <<https://anaiscbc.emnuvens.com.br/anais/article/view/910/910>>. Acesso em: 31 out. 2017.

MARQUES, C. F. **Estratégia de gestão da produção e operações**. Curitiba: IESDE, 2012. Disponível em: <<http://www.loocalizei.com.br/mortalidade-de-pequenas-empresas/>>. Acesso em: 12 de jul. de 2017.

OHNO, T. **O sistema Toyota de produção**: além da produção em larga escala. Porto Alegre: Bookman, 1997. 150 p.

ORGANIZAÇÃO PARA A COOPERAÇÃO E DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO. **Manual de Oslo**: diretrizes para coleta e interpretação de dados sobre inovação. 3 ed. Paris: OCDE, 2005. Disponível em: <<http://www.finep.gov.br/images/apoio-e-financiamento/manualoslo.pdf>>. Acesso em: 30 nov. 2017.

SERVIÇO BRASILEIRO DE APOIO ÀS MICRO E PEQUENAS EMPRESAS. **Sobrevivência das empresas no Brasil**. Brasília, 2016. Disponível em: <<https://m.sebrae.com.br/Sebrae/Portal%20Sebrae/Anexos/sobrevivencia-das-empresas-no-brasil-102016.pdf>>. Acesso em: 17 ago. 2017.

Avaliação de desempenho térmico de habitações segundo a Norma ABNT NBR 15575: aspectos a aprimorar¹

Thermal performance evaluation of dwellings according to ABNT NBR 15575 Standards: aspects for improvement

Adriana Camargo de Brito^a, Elisa Morande Salles^a, Fúlvio Vittorino^b, Marcelo de Mello Aquilino^a, Maria Akutsu^a

a Laboratório de Conforto Ambiental, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A., São Paulo-SP, Brasil.

b Diretoria do Centro Tecnológico do Ambiente Construído, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A., São Paulo-SP, Brasil.

*E-mail: adrianab@ipt.br

Palavras-chave:
habitação; desempenho térmico.

Keywords:
dwelling; thermal assessment.

Resumo

Este artigo apresenta uma discussão a respeito de problemas identificados nos métodos de avaliação do desempenho térmico de habitações presentes na Norma NBR 15575 da Associação Brasileira de normas Técnicas, que é a principal referência utilizada atualmente para avaliar sistemas construtivos no âmbito do Sistema Nacional de Avaliações Técnicas – SINAT, cujos resultados são utilizados por órgãos governamentais para a concessão de financiamentos imobiliários.

Abstract

This article presents a discussion about the problems in the methods for evaluating the thermal performance of dwellings defined by the NBR 15575 Standard of the Brazilian association for standardization which is the most important reference used to assess construction systems in the National System of Technical Evaluations - SINAT, whose results are used for granting loans to finance housing.

¹ Este artigo é um resumo de um capítulo do livro intitulado "Avaliação de desempenho de tecnologias construtivas inovadoras: conforto ambiental, durabilidade e pós-ocupação", organizado por Márcio Minto Fabricio, Adriana C. de Brito e Fúlvio Vittorino, disponível gratuitamente no seguinte endereço eletrônico: DOI - <http://dx.doi.org/10.26626/978-85-5953-029-2.2017B0001>

1 Introdução

Este trabalho é o primeiro de uma série de três artigos sobre métodos de avaliação do desempenho térmico de habitações presentes na Norma ABNT NBR 15575 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013), publicados na presente revista. Neste primeiro artigo, são indicados os métodos de avaliação e os problemas identificados na referida norma. Nos outros dois artigos são propostas soluções para o aprimoramento dos métodos de avaliação do desempenho térmico de habitações, respectivamente, o simplificado e o detalhado.

1.2 Métodos de avaliação do desempenho térmico de habitações

No Brasil, a norma NBR 15575 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013) estabelece três métodos de avaliação do desempenho térmico de habitações ventiladas naturalmente. Um método simplificado, que aborda características térmicas da envoltória da edificação (paredes externas e cobertura) e dois métodos detalhados, um por simulação computacional da habitação e outro que envolve medições no local.

O método simplificado estabelece valores limites para a transmitância térmica da cobertura (U), fator relacionado ao isolamento térmico deste componente e para a transmitância térmica (U) e capacidade térmica (C) de paredes. A capacidade térmica é relacionada à inércia térmica da edificação, que envolve a capacidade dos elementos construtivos em proporcionarem a redução das variações térmicas que ocorrem no interior dos ambientes em comparação com o que acontece no ambiente externo. Nas **Tabelas 1, 2 e 3** são apresentados, respectivamente, os valores limites para a transmitância térmica de coberturas, para a transmitância térmica de paredes e para a capacidade térmica de paredes nas várias regiões climáticas brasileiras.

Tabela 1 – Valores da transmitância térmica de coberturas.

Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas (2013).

Transmitância térmica da cobertura - U (W/(m ² .K))				
Zonas 1 e 2	Zonas 3 a 6		Zonas 7 e 8	
$I \leq 2,3$	$\alpha^* \leq 0,6$	$\alpha^* > 0,6$	$\alpha^* \leq 0,4$	$\alpha^* > 0,4$
	$U \leq 2,3$	$U \leq 1,5$	$U \leq 2,3 FT^{**}$	$U \leq 1,5 FT^{**}$

Nota: * Absortância à radiação solar da superfície externa da cobertura.

** Fator de correção da transmitância (FT), estabelecido na ABNT NBR 15.220-3.

Tabela 2- Valores da transmitância térmica de paredes externas.

Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas (2013).

Transmitância térmica de paredes externas - U (W/(m ² .K))		
Zonas 1 e 2	Zonas 3 a 8	
$U \leq 2,5$	$\alpha^* \leq 0,6$	$\alpha^* > 0,6$
	$U \leq 3,7$	$U \leq 2,5$

Nota: * Absortância à radiação solar da superfície externa da parede.

Tabela 3 - Valor da capacidade térmica de paredes externas.

Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas (2013).

Capacidade térmica de paredes externas CT (kJ/(m ² .K))	
Zona 8	Zonas 1 a 7
Sem exigência	≥ 130

Os valores limites dessas grandezas (capacidade térmica e transmitância térmica) levam em conta as características climáticas do país, exigindo, por exemplo, componentes com maior capacidade térmica em locais onde é necessária, como São Paulo, Zona Bioclimática 3. Quando um sistema é aprovado pelo método simplificado, há maior potencial de ser adequado ao clima do local, quando utilizado em habitações típicas, garantindo um desempenho térmico mínimo.

Sistemas construtivos tradicionais com componentes robustos, normalmente, atendem os critérios do método simplificado. Por outro lado, os sistemas mais inovadores, como aqueles com paredes leves feitas de chapas cimentícias ou placas de OSB (*Oriented Strand Board*), não atendem, especialmente, o valor limite mínimo para a capacidade térmica das paredes que costuma ser menor que 50 kJ/(m².K) (**Figura 1**). Nessas situações, é possível realizar avaliações pelos métodos detalhados (simulação ou medições) que levam em conta também a influência do projeto arquitetônico, que se bem elaborado, pode contribuir para a melhoria do desempenho térmico da edificação e viabilizar o uso de um sistema pouco adequado ao clima do local. O método mais utilizado atualmente é o de simulações computacionais, que permite seu uso em qualquer época, diferente do método de medições, que depende da estação do ano e condições meteorológicas para ser utilizado.

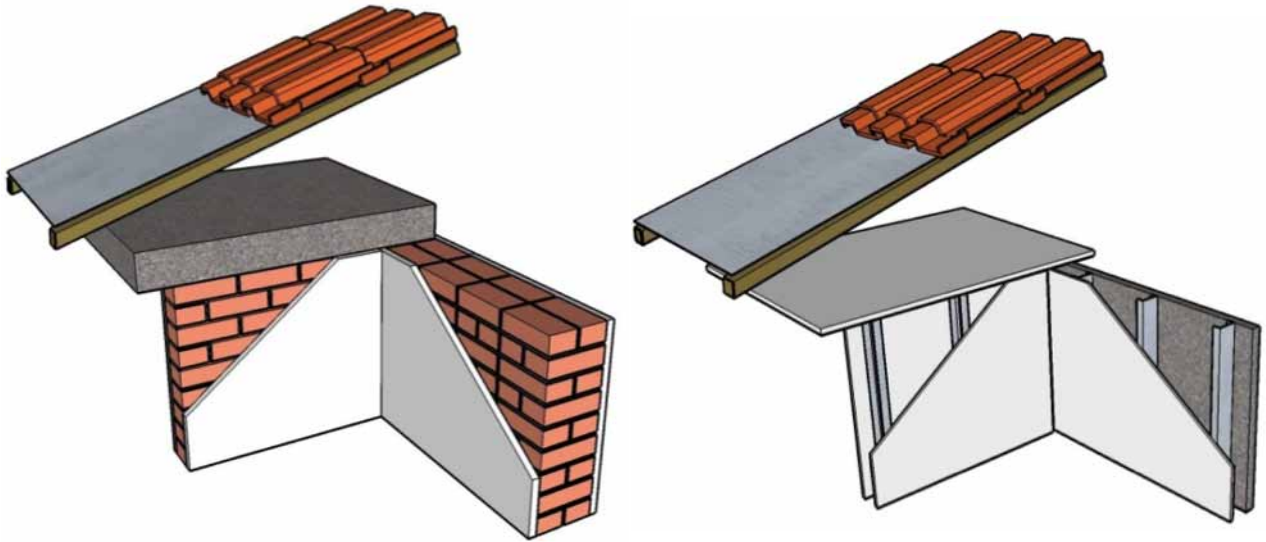


Figura 1 – Exemplo de sistema construtivo tradicional (à esquerda) e sistema inovador (à direita).
Fonte: Elaborado pelos autores.

As simulações computacionais são feitas com programas nos moldes do EnergyPlus, para toda a edificação, analisando-se os resultados de dormitórios e salas expostos a determinadas orientações solares e condições climáticas de dias típicos de verão e de inverno (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013). No programa, é construída a habitação em três dimensões, atribuindo características térmicas e físicas às faces dos fechamentos, como paredes, pisos, janelas, cobertura etc.

As habitações são simuladas desocupadas, com várias condições de ventilação de recintos e sombreamento de janelas. São analisados os valores das temperaturas do ar interior e exterior, sendo indicado o atendimento dos critérios referentes aos níveis mínimo, intermediário ou superior de desempenho térmico, para as zonas climáticas brasileiras, como indicado nas **Tabelas 4 e 5**.

Tabela 4 – Critério de avaliação do desempenho térmico de edificações para condições de verão.
Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas (2013).

Nível de Desempenho	Critério	
	Zonas 1 a 7	Zonas 1 a 7
Mínimo	$T_{im\acute{a}x} \leq T_{em\acute{a}x}$	$T_{im\acute{a}x} \leq T_{em\acute{a}x}$
Intermediário	$T_{im\acute{a}x} \leq (T_{em\acute{a}x} - 2\text{ }^{\circ}\text{C})$	$T_{im\acute{a}x} \leq (T_{em\acute{a}x} - 1\text{ }^{\circ}\text{C})$
Superior	$T_{im\acute{a}x} \leq (T_{em\acute{a}x} - 4\text{ }^{\circ}\text{C})$	$T_{im\acute{a}x} \leq (T_{em\acute{a}x} - 2\text{ }^{\circ}\text{C})$

Nota: $T_{im\acute{a}x}$ é o valor máximo diário da temperatura do ar interior, em graus Celsius.

$T_{em\acute{a}x}$ é o valor máximo diário da temperatura do ar exterior, em graus Celsius.

Tabela 5 – Critério de avaliação do desempenho térmico de edificações para condições de inverno.
Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas (2013).

Nível de Desempenho	Critério	
	Zonas 1 a 7	Zonas 6, 7 e 8
Mínimo	$T_{im\acute{i}n} \geq (T_{em\acute{i}n} + 3\text{ }^{\circ}\text{C})$	
Intermediário	$T_{im\acute{i}n} \geq (T_{em\acute{i}n} + 5\text{ }^{\circ}\text{C})$	Não precisa ser verificado
Superior	$T_{im\acute{i}n} \geq (T_{em\acute{i}n} + 7\text{ }^{\circ}\text{C})$	

Nota: $T_{im\acute{i}n}$ é o valor mínimo diário da temperatura do ar interior, em graus Celsius.

$T_{em\acute{i}n}$ é o valor mínimo diário da temperatura do ar exterior, em graus Celsius.

2 Procedimento metodológico

No âmbito dos inúmeros trabalhos realizados pelo Laboratório de Conforto Ambiental - LCA do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A. - IPT e do projeto de pesquisa, financiado pela FINEP - Inovação e Pesquisa, intitulado "Desenvolvimento de métodos e metodologias para avaliação de desempenho de tecnologias inovadoras no âmbito do Sistema Nacional de Avaliação Técnica - FINEP INOVATEC", foram feitas avaliações e análises do desempenho térmico de habitações pelo método simplificado e pelo detalhado, principalmente por simulações computacionais. Foram identificados problemas nos métodos e nos critérios presentes na norma ABNT NBR 15575 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013) para avaliação do desempenho térmico de habitações. Isso pode prejudicar os resultados das avaliações habitacionais, especialmente as relacionadas ao Sistema Nacional de Avaliações Técnicas - SINAT, utilizada por órgãos governamentais para a concessão de financiamentos.

3 Fatores a aprimorar nos métodos de avaliação do desempenho térmico

A seguir, são destacados os problemas encontrados nos métodos de avaliação do desempenho térmico de habitações constante na norma NBR 15575 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013).

3.1. Método simplificado

No método simplificado, não há informações dos limites de aplicabilidade do método, além disso, especialmente para a Zona Bioclimática 8, os critérios são pouco exigentes, podendo indicar o atendimento do nível "Mínimo", sem que a edificação tenha um desempenho mínimo quando construída.

3.2. Método Detalhado

Nesse método, é necessário rever os aspectos como os apresentados nos itens a seguir.

3.2.1 Tipo de avaliação

Dependendo do objetivo da avaliação, seja de uma edificação específica, ou de um sistema construtivo, há peculiaridades que devem ser levadas em consideração, bem como condições para as quais os resultados podem ser generalizados. Como na norma NBR 15575 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013) não há informações ou recomendações de qual método de avaliação deve ser utilizado para cada situação, nem em que circunstâncias, os resultados podem ser generalizados, isso fica a critério do avaliador decidir, prejudicando a consistência da avaliação.

No âmbito do SINAT, por exemplo, o objetivo da avaliação é identificar o desempenho térmico potencial de um sistema construtivo, pois os resultados são utilizados para aprovação de empreendimentos habitacionais com projetos diversos. Todavia, para se fazer avaliações por simulações ou medições, o sistema deve fazer parte de um projeto de habitação. Como o projeto interfere na resposta térmica da habitação, há dificuldade em identificar somente o desempenho potencial do sistema.

3.2.2 Dados climáticos

Não há dados de todos os dias típicos de projeto de cidades brasileiras para se efetuar avaliações, além de faltar informações sobre dados climáticos das cidades, como a temperatura do solo. A temperatura do solo é um fator fundamental para simular o comportamento de habitações térreas, devido às trocas de calor dos ambientes com o solo, podendo afetar de modo significativo o nível de desempenho da habitação.

No programa de simulação são inseridos os dados climáticos de dias típicos de verão e de inverno, mas não há informações na norma de referência que indiquem qual dia do ano deve ser considerado, fator importante para questões que requeiram análises de dispositivos de sombreamento.

Quanto ao zoneamento climático utilizado como referência para a avaliação do desempenho térmico de habitações, apresentado na Norma NBR 15.220 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008), identificou-se que cidades com climas diferentes são agrupados na mesma zona, o que não deveria ocorrer. Isso acontece devido à forma como o zoneamento foi feito. Essa forma teve como base os valores de temperatura e de umidade do ar, que representam algumas variáveis que afetam o conforto térmico humano, mas não abordam variáveis climáticas que afetam o desempenho térmico de edifícios, como a radiação solar e a amplitude diária da temperatura do ar. Assim, o zoneamento é inadequado para fins de avaliação do desempenho térmico de edificações.

3.2.3 Medições

A Norma NBR 15575 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013) apresenta somente procedimentos para a realização de medições das variáveis que representam a resposta térmica dos ambientes, porém, esta norma não apresenta procedimentos ou critérios para analisar os resultados quando as avaliações precisam ser feitas em períodos do ano nos quais há dificuldade de se obter condições climáticas iguais às dos dias típicos de projeto.

4 Proposta conceitual para aprimorar os métodos de avaliação do desempenho térmico de habitações e sistemas construtivos

Para que os resultados das avaliações sejam mais consistentes é necessário determinar o objetivo da avaliação e estabelecer procedimentos para alcançá-lo de modo adequado. Foram identificados três tipos de possíveis avaliações:

- a. avaliação do desempenho térmico de edificação existente;
- b. avaliação do projeto de edificação a ser construída em um determinado terreno; e
- c. avaliação do potencial de um sistema construtivo ser adequado ao clima do local.

4.1 Avaliação de edificação existente por medições

Quando se avalia o desempenho térmico de uma habitação por medições no local, os resultados dependem, não só do projeto e do sistema construtivo, mas também do microclima do local que sofre influências do entorno imediato. Dessa forma, é recomendável realizar medições somente em casos específicos, sendo os resultados aplicáveis somente à edificação analisada naquele local.

4.2 Avaliação de projeto por simulações

Avaliação do desempenho térmico potencial de um projeto a ser construído em terreno específico, por meio de simulações, representa situação semelhante à apresentada no item 4.1, ou seja, como são consideradas características específicas de geometria, orientação geográfica de aberturas, dentre outras, os resultados são aplicáveis somente à edificação analisada.

5 Avaliação de sistema construtivo

No SINAT, para identificar o desempenho potencial do sistema construtivo quando exposto a determinado clima, é necessário estabelecer procedimentos que reduzam o efeito de outras variáveis, como o projeto e o microclima do local, por exemplo, na resposta térmica da edificação. Isso pode ser feito adotando-se avaliações por simulação, com programa específico, um projeto padrão de ensaio e condições também padronizadas de exposição ao clima, permitindo que se analise, de modo comparativo, o desempenho de vários sistemas construtivos com componentes leves ou pesados consagrados pelo uso ou inovadores.

6 Considerações finais

Os problemas identificados nos métodos de avaliação do desempenho térmico de habitações segundo a Norma NBR 15575 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013) são o primeiro passo para incentivar discussões e pesquisas que contribuam para a sua melhoria, o que, conseqüentemente, gerará resultados mais consistentes de avaliações, beneficiando os futuros usuários das habitações.

7 Agradecimentos

Os autores agradecem à FINEP – Inovação e Pesquisa pelo financiamento da pesquisa da qual esta publicação faz parte.

8 Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220**: Desempenho Térmico de Edificações. Rio de Janeiro, 2008.

_____. **NBR 15575**: Edifícios Habitacionais – Desempenho. Rio de Janeiro, 2013.

Avaliação de desempenho térmico de habitações segundo a norma ABNT NBR 15575: proposta para aprimoramento do método simplificado¹

Improving the simplified method for thermal assessment of Brazilian dwellings

Adriana Camargo de Brito^a, Elisa Morande Salles^a, Fúlvio Vittorino^b, Marcelo de Mello Aquilino^a, Maria Akutsu^a

^a Laboratório de Conforto Ambiental, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A., São Paulo-SP, Brasil.

^b Diretoria do Centro Tecnológico do Ambiente Construído, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A., São Paulo-SP, Brasil.

*E-mail: adrianab@ipt.br

Palavras-chave:

habitação; desempenho térmico; método simplificado.

Keywords:

dwellings; thermal assessment; simplified method.

Resumo

Este artigo apresenta sugestões para aprimorar o método simplificado de avaliação do desempenho térmico de habitações presentes na norma ABNT NBR 15575 (ABNT, 2013), que é a principal referência utilizada atualmente para avaliar sistemas construtivos no âmbito do Sistema Nacional de Avaliações Técnicas – SINAT.

Abstract

This article presents suggestions for improving the simplified method for evaluating the thermal performance of dwellings present in the Standard ABNT NBR 15575 (ABNT, 2013) which is the most important reference used to assess construction systems in the National System of Technical Evaluations - SINAT.

Este artigo é um resumo de um capítulo do livro intitulado "Avaliação de desempenho de tecnologias construtivas inovadoras: conforto ambiental, durabilidade e pós-ocupação", organizado por Márcio Minto Fabricio, Adriana C. de Brito e Fúlvio Vittorino, disponível gratuitamente no seguinte endereço eletrônico: DOI - <http://dx.doi.org/10.26626/978-85-5953-029-2.2017B0001>

1 Introdução

Este trabalho é o segundo de uma série de três artigos sobre métodos de avaliação do desempenho térmico de habitações presentes na Norma ABNT NBR 15575 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013), publicados na presente revista. São apresentadas propostas para aprimorar o método simplificado de avaliação de desempenho térmico de habitações.

1.2 Método simplificado

O método simplificado de avaliação do desempenho térmico de habitações (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013), que tem critérios referentes somente às características térmicas da envoltória (transmitância térmica e capacidade térmica da fachada e transmitância térmica da cobertura), tem como objetivo impor limites para que habitações com sistemas construtivos totalmente inadequados ao clima não sejam utilizadas. Entretanto, nos moldes atuais da referida norma, há ausência de informações quanto aos limites de aplicabilidade do método, referente às características do projeto da edificação, além de critérios pouco exigentes para a Zona Bioclimática 8, bem como valores de absorvância à radiação solar de componentes (cor do acabamento externo) que são diferentes no método simplificado e no método detalhado (uma cor média tem absorvância de 0,4 a 0,6 no método simplificado, enquanto no método detalhado, seria igual a 0,5).

1.3 Características do projeto

Vários autores têm evidenciado que algumas variáveis de projeto podem ter efeito significativo na resposta térmica da edificação, como a forma e dimensões dos ambientes, a orientação solar, elementos de sombreamento de aberturas, como brises, beirais ou terraços, e a área envidraçada na fachada (BRITO, 2015; CLARO, 2010; GRATIA; HERD, 2002; HERD; GRATIA, 2002; AKUTSU; VITTORINO, 1990).

Nesse contexto, avaliar somente as características do sistema construtivo não é suficiente para indicar adequadamente o desempenho térmico de uma habitação. Uma habitação com área envidraçada na fachada substancialmente mais significativa que a área opaca, por exemplo, terá seu desempenho térmico definido pelo vidro e não pelo sistema construtivo avaliado. Na **Figura 1**, são indicados exemplos de habitações com diferentes áreas envidraçadas na fachada e várias condições de sombreamento de aberturas que, mesmo se construídas com sistemas construtivos idênticos, podem apresentar diferentes níveis de desempenho térmico na prática. Assim, para impedir que o método simplificado seja utilizado dessa maneira, é necessário acrescentar algumas características da edificação para as quais o método é válido.

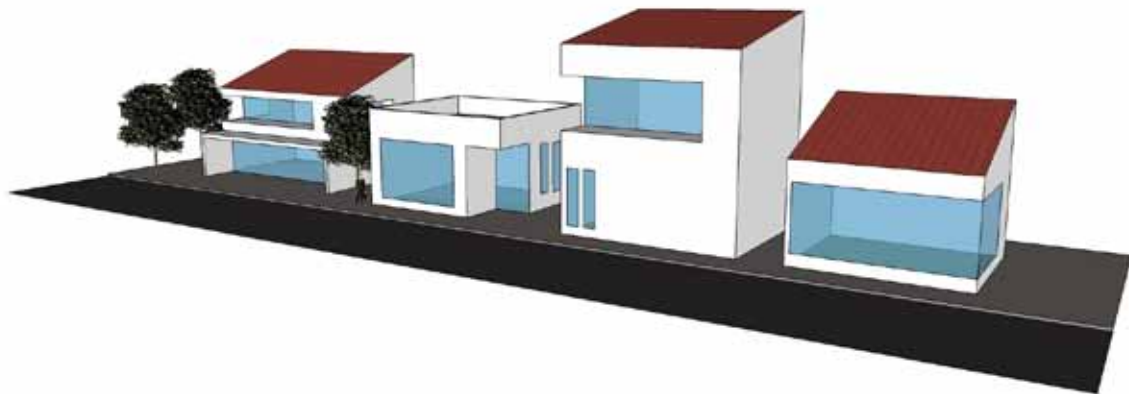


Figura 1 – Exemplo de habitações com diferentes proporções de área envidraçada na fachada e elementos de sombreamento de aberturas.
Fonte: Elaborado pelos autores.

1.4 Critérios para a Zona Bioclimática 8

Para essa Zona Bioclimática, os critérios referem-se à transmitância térmica de paredes e cobertura, sem considerar a capacidade térmica de paredes, que nesse clima pode ser desfavorável. A transmitância térmica é um fator relacionado à isolamento térmica dos componentes.

Elementos com baixa transmitância térmica dificultam as trocas de calor entre ambientes, sendo amplamente utilizados em edifícios em locais com inverno rigoroso, onde há perdas constantes de calor para o exterior. Em locais com clima predominante de verão e radiação solar intensa, o uso de materiais isolantes térmicos em edificações deve ser feito com cautela, pois, se por um lado podem reduzir ganhos de calor provenientes do contato com o exterior, por outro, reduzem também as perdas de calor para o exterior. Dependendo do tipo de edificação e fontes internas de calor, isso pode gerar condições térmicas indesejáveis na edificação.

Os critérios de avaliação indicam somente valores máximos para a transmitância térmica de paredes, variando de $2,5 \text{ kJ}/(\text{m}^2.\text{K})$ a $3,7 \text{ kJ}/(\text{m}^2.\text{K})$, dependendo da cor do acabamento da parede. Como não há valores limites mínimos dessa grandeza, nem valores de referência para a capacidade térmica, paredes extremamente leves e isolantes térmicas atenderiam os critérios, todavia, na prática, poderiam proporcionar ambientes excessivamente quentes, causando desconforto ao usuário.

2 Método

Para gerar contribuições para melhorar o método simplificado de avaliação do desempenho térmico de habitações foram feitos os procedimentos indicados nos itens 2.1 e 2.2, respectivamente, referentes à delimitação de características da edificação que precisam ser consideradas no método e revisão dos intervalos de valores das características térmicas da envoltória, na Zona Bioclimática 8.

2.1 Efeito das características do projeto no desempenho térmico de habitação

Foram feitas simulações computacionais da resposta térmica de um projeto típico de habitação, com uso do programa EnergyPlus, contemplando alterações no projeto com ampliações ou reduções proporcionais das dimensões de toda a edificação em até 35 % do tamanho original, aumento do pé-direito em até 0,50 m e aumento da área envidraçada da fachada em relação à área de piso do recinto de inicialmente 15 % (valor limite mínimo para iluminação natural segundo o Código de Obras da cidade de São Paulo), até o dobro dessa área, com intervalos de 5 % (SALES; AKUTSU; BRITO, 2014).

Foram utilizados dois tipos de sistemas: pesado, com paredes e lajes de concreto tradicional com 10 cm de espessura e telhado em telhas de fibrocimento. Há 4 cm de EPS sobre a laje e, e sistema leve, com paredes em chapa cimentícia na face externa e gesso acartonado na face interna, com espessura total de 10 cm e cobertura com forro de gesso, com 10 cm de lã de vidro sobre o forro. Foram adotadas condições climáticas de dias típicos de verão das cidades de São Paulo - SP e Manaus - AM, regiões com características, respectivamente, de verão e inverno e com predomínio de verão (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008), com base nos procedimentos da norma NBR 15575 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013).

2.2 Efeito das características da envoltória no desempenho térmico de habitações na Zona Bioclimática 8

Foram feitas avaliações do desempenho térmico de habitações com o uso dos métodos simplificado e detalhado, por simulação computacional, com base na norma NBR 15575 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013), com janelas sombreadas e ventilação dos ambientes com taxa de 5 renovações do volume de ar do recinto por hora, utilizando 21 sistemas construtivos (7 tipos de paredes e 3 tipos de coberturas), com valores significativamente diferentes quanto à capacidade térmica e transmitância térmica (**Tabela 1**). Foram verificadas as situações em que a edificação atende aos critérios do método simplificado, mas não atendem aos critérios do método detalhado, bem como, quais características dos sistemas construtivos seriam mais adequadas para obtenção de recintos com melhor desempenho térmico na Zona Bioclimática 8.

Tabela 1 – Descrição de paredes e coberturas dos 21 sistemas construtivos

Descrição a partir da face externa		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U		
Parede (com acabamento externo em cor clara)	1 Placa cimentícia com espessura de 1 cm, espaço de ar, com espessura de 9 cm e gesso acartonado, com espessura de 12,5 mm	X							X							X								
	2 Placa cimentícia com espessura de 1 cm, lâ de rocha com espessura de 5 cm e gesso acartonado, com espessura de 12,5 mm		X							X							X							
	3 Placa cimentícia com espessura de 1 cm, lâ de rocha com espessura de 7,5 cm e gesso acartonado, com espessura de 12,5 mm			X							X								X					
	4 Painel de concreto leve, espessura de 5 cm, espaço de ar com espessura de 5 cm e gesso acartonado, com espessura de 12,5 mm				X							X								X				
	5 Painel de concreto leve, espessura de 5 cm					X							X								X			
	6 Painel de concreto leve, espessura de 7,5 cm						X							X								X		
	7 Painel de concreto leve, espessura de 10 cm							X								X							X	
Cobertura	I Telha cerâmica, espessura média de 2 cm, espaço de ar com espessura média de 40 cm e forro de gesso acartonado, com espessura de 12,5 mm	X	X	X	X	X	X	X																
	II Mesma configuração de I, com acréscimo de 5 cm de lâ de rocha sobre o forro								X	X	X	X	X	X	X									
	III Mesma configuração de I, com acréscimo de 10 cm de lâ de rocha sobre o forro															X	X	X	X	X	X	X	X	X

Fonte: Elaborado pelos autores.

*faixas de teores entre as 4 ligas analisadas

3 Resultados

No item 3.1, são apresentados os resultados referentes ao efeito das variáveis de projeto na resposta térmica da edificação e, no item 3.2, os resultados quanto às características térmicas da envoltória para habitações na Zona Bioclimática 8.

3.1. Efeito das características do projeto no desempenho térmico de habitação

Nas duas cidades, variações proporcionais nas dimensões horizontais dos ambientes da habitação, reduzindo ou aumentando a sua área de piso em até 35% da área original, não afetam seu desempenho térmico de modo significativo, se forem mantidas as proporções entre a área envidraçada na fachada e a área de piso de cada recinto, como indicado no exemplo da **Figura 2**. Considerando-se um pé-direito mínimo nos ambientes de 2,5 m, variações de até 0,5 m não afetam de modo significativo o desempenho térmico dos ambientes (**Figura 3**).

Entretanto, quando se trata da área envidraçada na fachada, um aumento dessa área afeta o desempenho térmico dos ambientes de modo mais significativo, especialmente com os sistemas leves (**Figura 4**).

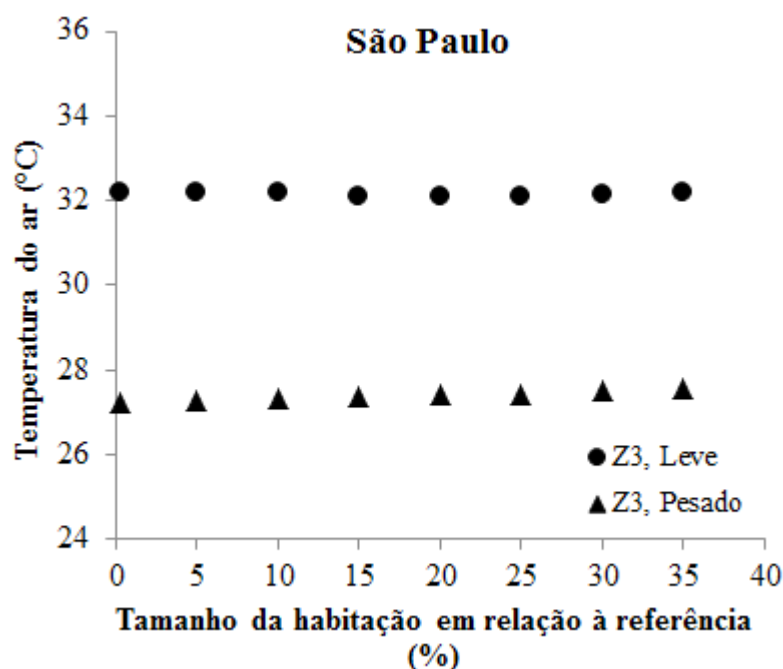


Figura 2 – Temperatura máxima do ar interior de recinto habitacional em função do tamanho da edificação em São Paulo.

Fonte: Elaborado pelos autores.

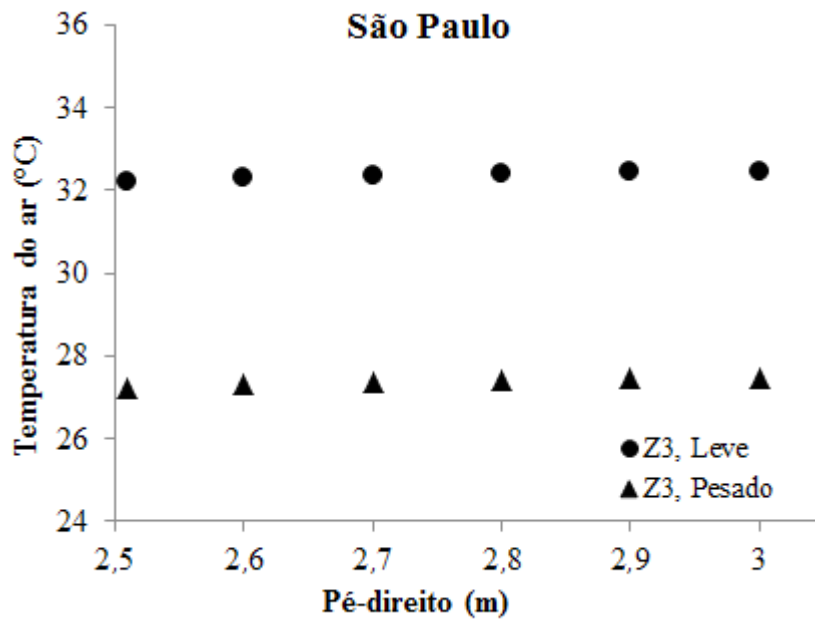


Figura 3 - Temperatura máxima do ar interior de recinto habitacional no tamanho original em função do pé-direito da edificação em São Paulo.
Fonte: Elaborado pelos autores.

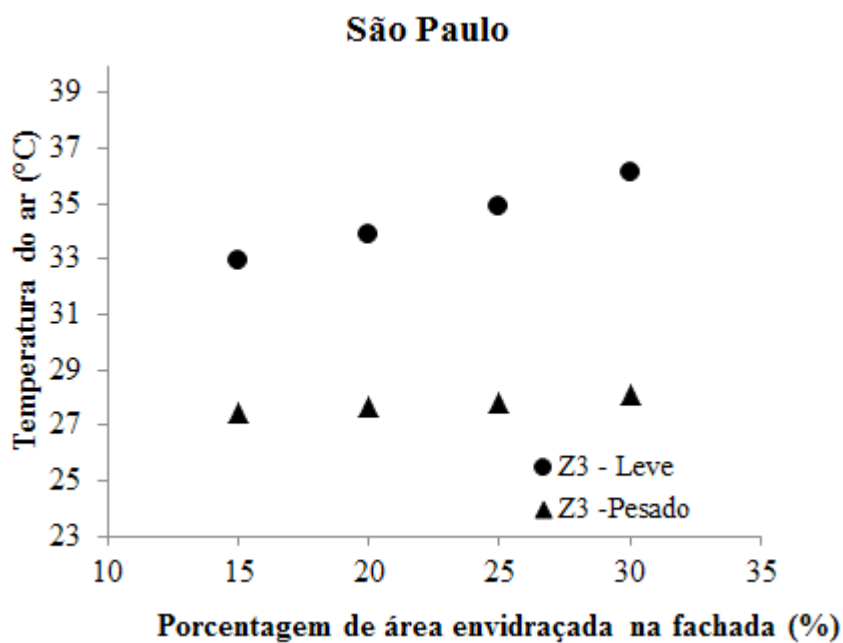


Figura 4 - Temperatura máxima do ar interior de recinto habitacional em função da área envidraçada na fachada em relação à área de piso do recinto em São Paulo.
Fonte: Elaborado pelos autores.

Como a área envidraçada na fachada é um fator que produz efeitos mais significativos na resposta térmica dos ambientes, é importante considerá-lo na delimitação das condições de uso do método simplificado de avaliação do desempenho térmico de habitações.

3.2. Efeito das características da envoltória no desempenho térmico de habitações na Zona Bioclimática 8

Na avaliação pelo método simplificado há vários componentes construtivos que não atendem o nível "Mínimo" de desempenho térmico, como as paredes 5 a 7 e a cobertura I, indicadas na **Tabela 2**, nas células destacadas em verde claro.

Tabela 2 – Características térmicas dos componentes e atendimento dos critérios referentes ao nível "Mínimo" de desempenho térmico pelo método simplificado (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013).

Descrição	Transmitância Térmica - TT (W/(m ² .K))	Capacidade Térmica - CT (kJ/(m ² .K))
Parede ($\alpha^* = 0,30$)	1	2,75
	2	0,68
	3	0,48
	4	2,55
	5	4,86
	6	4,47
Cobertura ($\alpha^* = 0,65$)	7	200
	I	-
	II	-
	III	-

Pelo método de simulação, cujos resultados são indicados na **Figura 5**, não é atendido o nível "Mínimo" de desempenho térmico por edificações sem isolante térmico na cobertura ($TT = 2,02$ W/(m².K)), independentemente do tipo de parede (sistemas "A" até "G", **Tabela 1**). Com a colocação de 5 cm de isolante térmico na cobertura ($TT = 0,57$ W/(m².K)), a edificação atende o nível "Mínimo" de desempenho térmico com os sistemas construtivos "M" e "N" (**Tabela 1**), que têm paredes de maior capacidade térmica (CT de 140 kJ/(m².K) a 200 kJ/(m².K)). Com 10 cm de isolante térmico na cobertura, é atendido o nível "Mínimo" com uso dos sistemas construtivos com paredes com maior isolamento térmico ($TT = 0,68$ W/(m².K)), com os sistemas "P" e "Q" (**Tabela 1**), bem como, com paredes de maior capacidade térmica ($CT > 140$ kJ/(m².K)), com sistemas "T" e "U" (**Tabela 1**).

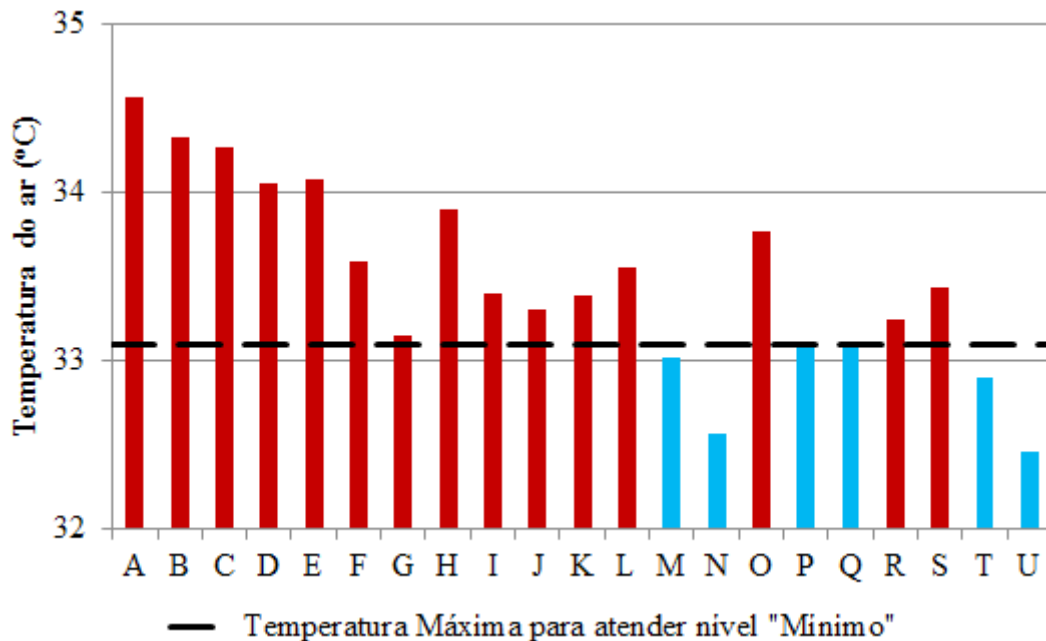


Figura 5 – Temperaturas máximas do ar interior por sistema e valor limite da temperatura do ar interior para obter o nível "Mínimo" de desempenho térmico pelo método de simulação.

Fonte: Elaborado pelos autores.

Analisando os resultados obtidos com os dois métodos de avaliação, identifica-se que há inconsistências, visto que há situações em que é atendido o nível "Mínimo" pelo método simplificado, mas não é atendido no detalhado, cujos resultados são próximos do que irá ocorrer na prática (Sistemas "H", "I", "J", "K", "O" e "R", **Tabela 1**), como indicado na **Tabela 3**.

O método simplificado aborda somente a transmitância térmica das paredes, desconsiderando a sua capacidade térmica, pois se baseia em diretrizes de projeto para a Zona Bioclimática 8 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008), onde a inércia térmica da edificação precisa ser usada com ponderação para não prejudicar o desempenho térmico dos ambientes.

Entretanto, quando a cobertura tem alta isolamento térmica, é possível obter um nível de desempenho térmico adequado, mesmo com paredes mais pesadas, com maior capacidade térmica, além das paredes leves. Retomando-se a referida norma quando se tratava de um projeto em 2003, no método simplificado de avaliação do desempenho térmico de habitações, para a Zona Bioclimática 8, as paredes externas precisariam ter uma capacidade térmica mínima de $C \geq 45 \text{ kJ}/(\text{m}^2.\text{K})$.

Se esse critério fosse adotado, os sistemas construtivos "H", "I" e "J" (**Tabela 1**) não atenderiam o nível "Mínimo" pelo método simplificado, obrigando os avaliadores a utilizar o método detalhado. Isso destacaria a inadequação do sistema construtivo ao clima do local, não atendendo o critério "Mínimo" também por simulação.

Tabela 3 – Resultados indicando o nível de desempenho térmico obtido com os métodos simplificado e detalhado de avaliação de desempenho térmico

Sistema	Critérios do método simplificado	Critérios do método detalhado
A	Não atende	Não atende
B	Não atende	Não atende
C	Não atende	Não atende
D	Não atende	Não atende
E	Não atende	Não atende
F	Não atende	Não atende
G	Não atende	Não atende
H	Mínimo	Não atende
I	Mínimo	Não atende
J	Mínimo	Não atende
K	Mínimo	Não atende
L	Não atende	Não atende
M	Não atende	Mínimo
N	Não atende	Mínimo
O	Mínimo	Não atende
P	Mínimo	Mínimo
Q	Mínimo	Mínimo
R	Mínimo	Não atende
S	Não atende	Não atende
T	Não atende	Mínimo
U	Não atende	Mínimo

Nota: Em destaque são indicados os elementos que atendem o nível "Mínimo" de acordo com o método simplificado mas não atendem o nível "Mínimo" segundo o método detalhado.

4 Recomendações

Recomenda-se que o método simplificado de avaliação do desempenho térmico de habitações seja utilizado somente se os ambientes tiverem área envidraçada na fachada de, no máximo, 15 % da área de piso do recinto. Para edificações que não se enquadrem nessa exigência, deve ser feita avaliação do seu desempenho térmico, necessariamente, pelo método detalhado. Para as Zonas Bioclimáticas 1 a 7, nas quais os valores limites para a transmitância térmica de coberturas e paredes são indicados em função da absortância à radiação solar de suas superfícies externas, entre 0,4 e 0,6, sugere-se a substituição desses valores por 0,5 (ambos podem ser considerados cor média), como indicado nas **Tabelas 4 e 5**. Essa alteração se justifica por proporcionar uma uniformização de informações presentes em critérios do método simplificado e detalhado, sem prejudicar o rigor dos critérios.

Tabela 4 – Valores da transmitância térmica de coberturas

Transmitância térmica da cobertura - TT (W/(m ² .K))		
Zonas 1 e 2	Zonas 3 a 7	
$U \leq 2,3$	$\alpha^* \leq 0,5$	$\alpha^* > 0,5$
	$U \leq 2,3$	$U \leq 1,5$

Nota: * absorvância à radiação solar da superfície externa da cobertura. Cores claras geralmente são aquelas com absorvância à radiação solar menor ou igual a 0,3 ($\alpha \leq 0,3$), cores médias costumam ter absorvância entre 0,3 e 0,7 ($0,3 \leq \alpha \leq 0,7$) e, cores escuras, aquelas com absorvância maior ou igual a 0,7 ($\alpha \geq 0,7$).

Tabela 5 – Valores da transmitância térmica de paredes externas

Transmitância térmica de paredes externas TT (W/(m ² .K))**		Capacidade térmica de paredes externas CT (kJ/(m ² .K))**	
Zonas 1 e 2	Zonas 3 a 7	Zonas 1 a 7	
$U \leq 2,5$	$\alpha^* \leq 0,5$	$\alpha^* > 0,5$	≥ 130
	$U \leq 3,7$	$U \leq 2,5$	

Notas: * Absorvância à radiação solar da superfície externa da parede. Cores claras geralmente são aquelas com absorvância à radiação solar menor ou igual a 0,3 ($\alpha \leq 0,3$), cores médias costumam ter absorvância entre 0,3 e 0,7 ($0,3 \leq \alpha \leq 0,7$) e, cores escuras, aquelas com absorvância maior ou igual a 0,7 ($\alpha \geq 0,7$).

**Valores referentes a paredes com área envidraçada na fachada de até 15 % da área de piso do ambiente. Para paredes com maior área envidraçada na fachada, é necessário efetuar a avaliação pelo método detalhado.

Para a Zona Bioclimática 8, propõe-se a adoção de transmitância térmica máxima para a cobertura da ordem de 0,6 W/(m².K), além de definir valores limites para as propriedades térmicas de paredes, quanto à sua capacidade térmica e à sua transmitância térmica, em função da isolamento térmica da cobertura, contemplando tanto paredes mais pesadas, quanto paredes mais leves.

Na **Tabela 6**, são apresentados os valores sugeridos para a capacidade térmica e transmitância térmica de paredes e para a transmitância térmica de coberturas para edificações na Zona Bioclimática 8. Para cobertura com alta isolamento térmica, o efeito da cor da sua superfície externa no desempenho térmico da edificação é pouco significativo, por isso não foi abordado esse parâmetro (BRITO; AKUTSU, 2015).

Tabela 6 – Valores limite propostos para a transmitância térmica – U ((W/(m².K)) de coberturas e fachadas e para a capacidade térmica de fachadas na Zona Bioclimática 8

Cobertura	Fachada*	
U (W/[m ² .K])	U (W/(m ² .K))	C (kJ/(m ² .K))
$0,35 < U \leq 0,6$	$U \leq 3,7$	$C \geq 130$
$U \leq 0,35$	$U \leq 2,5$	$C \geq 45$

Nota: *Valores referentes a paredes externas com acabamento em cores claras, com absorvância à radiação solar (α) menor ou igual a 0,30 ($\alpha \leq 0,3$), com área envidraçada na fachada de até 15 % da área de piso do ambiente. Para paredes com maior absorvância à radiação solar ou maior área envidraçada na fachada, é necessário efetuar a avaliação pelo método detalhado.

5 Agradecimentos

Os autores agradecem à FINEP – Inovação e Pesquisa pelo financiamento da pesquisa da qual esta publicação faz parte.

6. Referências

AKUTSU, M.; BRITO, A. C. D.; CHIEPE, C. P. O efeito da capacidade térmica e da resistência térmica de paredes no desempenho térmico de habitação na cidade de São Paulo. In: Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 2012, Juiz de Fora. **Anais...** Juiz de Fora: Antac, 2012.

AKUTSU, M.; VITTORINO, F. Aplicação de Isolante Térmico em Edificações: Efeito no Conforto Térmico e nas Cargas Térmicas de Condicionamento de Ambientes. In: Encontro Nacional de Conforto Ambiental, 1990, Gramado. **Anais...** Gramado: Antac, 1990. p. 69-77.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220**: Desempenho Térmico de Edificações. Rio de Janeiro, 2008.

NBR 15575: Edifícios Habitacionais – Desempenho. Rio de Janeiro, 2013.

BRITO, A. C.; AKUTSU, M; VITORINO, F.; AQUILINO, M. M. Contribuições para o aprimoramento da NBR 15.575 referente ao método simplificado de avaliação de desempenho térmico de edifícios In Encontro Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído (ENTAC 2012), 2012, Juiz de Fora. **Anais...** Juiz de Fora: Antac, 2012.

BRITO, A. C.; AKUTSU, M. Contribuição da cor da cobertura na melhoria do desempenho térmico de habitação no período de verão. In: XIII Encontro Nacional e IX Encontro Latino-americano de Conforto no Ambiente Construído (ENCAC 2015), 2015, Campinas. **Anais...** Campinas: Antac, 2015.

BRITO, Adriana Camargo de. **Contribuição da inércia térmica na eficiência energética de edifícios de escritórios na cidade de São Paulo**. 2015. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica de Energia de Fluidos) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3150/tde-13062016-102613/>>.

CLARO, M. S. **Análise do efeito do envidraçamento sobre a eficiência energética de fachadas em edifícios de escritórios de grande porte na cidade de São Paulo**. 2010, 194 p. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT, São Paulo, 2010.

DI PERNA, C.; STAZI, F.; CASALENA, A. U.; D'ORAZIO, M. Influence of the internal thermal inertia of the building envelope on summertime comfort in buildings with high internal loads. **Energy and Buildings**. 43, 200-206, 2011.

FERRARI, S. Building envelope and heat capacity: re-discovering the thermal mass for winter energy saving. In: 2nd PALENC Conference and 28th AIVC Conference on Building Low Energy Cooling and Advanced Ventilation Technologies in the first 21th Century, 2007, Crete. **Anais...** Crete, 2007. p. 346-351.

GRATIA, E.; DE HERDE, A. Design of low energy office buildings. **Energy and Buildings**. 35, 473-491, 2002.

HERDE, A. D.; GRATIA, E. A simple design tool for the thermal study of an office building. **Energy and Buildings**. 34, 279-289, 2002.

SALES, E. M.; AKUTSU, M.; BRITO, A. C. Efeito de variações no projeto de arquitetura de uma habitação no seu desempenho térmico In: XV encontro nacional de tecnologia do ambiente construído (ENTAC 2014), 2014, Maceió. **Anais...** Maceió: Antac, 2014.

Avaliação de desempenho térmico de habitações segundo a Norma ABNT NBR 15575: proposta para aprimoramento do método detalhado

Improving the detailed method for thermal assessment of Brazilian dwellings

Adriana Camargo de Brito^a, Elisa Morande Salles^a, Fúlvio Vittorino^b, Marcelo de Mello Aquilino^a, Maria Akutsu^a

^a Laboratório de Conforto Ambiental, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A., São Paulo-SP, Brasil.

^b Diretoria do Centro Tecnológico do Ambiente Construído, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A., São Paulo-SP, Brasil.

*E-mail: adrianab@ipt.br

Palavras-chave:
habitação; desempenho térmico, método detalhado.

Keywords:
dwelling; thermal performance, detailed method.

Resumo

Neste artigo, são apresentadas sugestões para aprimorar o método detalhado de avaliação do desempenho térmico de habitações constantes na Norma ABNT NBR 15575. Essa é a norma mais utilizada atualmente como referência para avaliar sistemas construtivos no âmbito do Sistema Nacional de Avaliações Técnicas – SINAT.

Abstract

This article presents some suggestions for improvement to the detailed method for evaluating the thermal performance of dwellings treated in the ABNT NBR 15575 Standard which is the most important reference used to assess construction systems in the National System of Technical Evaluations - SINAT.

1 Introdução

Este trabalho é o terceiro de uma série de três artigos sobre métodos de avaliação do desempenho térmico de habitações presentes na Norma ABNT NBR 15575 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013) publicados na presente revista. São apresentadas propostas para aprimorar o método detalhado de avaliação de desempenho térmico de habitações, principalmente, por simulações computacionais.

1.2 Método detalhado de avaliação do desempenho térmico de habitações

O método detalhado de avaliação do desempenho térmico de habitações, seja por simulações ou medições, considera a edificação como um todo, ou seja, o projeto, aberturas e outros detalhes do edifício, além do seu sistema construtivo (paredes, cobertura, piso). Nesse método, há vários fatores que precisam ser revistos, com o intuito de tornar a referida norma mais completa e propor complementos a serem utilizados, especificamente, no âmbito do SINAT. Como evidenciado no primeiro artigo desta série, é necessário rever ou completar dados climáticos, como a temperatura do solo sob edificações térreas e dados climáticos de cidades nas Zonas Bioclimáticas 2 e 5, ambos não disponíveis na norma. Também há inconsistências no zoneamento climático utilizado como referência do método, que consta na norma NBR 15220 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008), além da ausência de informações sobre em quais situações devem ser efetuadas avaliações por medição ou simulação e o detalhamento dos procedimentos para avaliações.

Na segunda seção deste artigo, são descritas as atividades que fundamentaram a proposta de aprimoramento do referido método para solução dos problemas encontrados na norma NBR 15575 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013). Na terceira seção, é apresentada a proposta de procedimentos para a realização de avaliações pelo método detalhado.

2 Etapas de trabalho

2.1 Temperatura do solo

Vários autores indicam a possibilidade de se fazer correlações entre os valores da temperatura do ar e os valores da temperatura do solo (COSTA; GODOY, 1962; GOEDERT, 1971; KUSUDA; ACHENBACH, 1965; ALFONSI; SENTELHAS, 1996; AZEVEDO; GAVAMI, 2003; VILELA, 2004; UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY, 2015; FLORIDES; KALOGIROU, 2004). Isso possibilita estimar o valor da temperatura do solo a partir da temperatura do ar, geralmente fornecida por estações meteorológicas.

Com base nisso, foram efetuadas análises dos dados disponíveis em literatura referentes tanto à temperatura do ar (INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA, 2015; UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY, 2015; ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013) quanto à temperatura do solo em cidades brasileiras (UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY, 2015), além da análise de trabalhos de pesquisadores brasileiros que apresentam procedimentos para estimar a temperatura do solo com base na temperatura média do ar (ALFONSI; SENTELHAS, 1996; AZEVEDO; GALVAMI, 2003).

Como vários autores destacam que a temperatura superficial do solo, ou em profundidades menores que 40 cm, é afetada de modo mais significativo pelas condições térmicas externas (COSTA, 1962; GOEDERT, 1971; KUSUDA, 1965; ALFONSI; SENTELHAS, 1996; AZEVEDO; GALVAMI, 2003; VILELA, 2004), considerou-se que seria adequado usar valores de temperatura do solo em maior profundidade, por sofrer menor influência do ambiente externo. Para permitir análises comparativas entre dados das várias fontes ou procedimentos de cálculo da temperatura do solo, selecionaram-se aqueles com dados para profundidades da mesma ordem de grandeza, entre 40 cm e 50 cm.

2.1.1 Método

Para propor valores da temperatura do solo para dias típicos de verão e inverno, selecionaram-se os maiores e os menores valores da temperatura média mensal do ar obtida das normais climatológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (2015) e dos arquivos climáticos anuais do United States Department of Energy (2015). Esses valores foram utilizados nas equações de Alfonsi e Sentelhas (1996) e Azevedo e Galvami (2003) para obtenção da temperatura do solo em profundidade de 40 cm. Dentre os valores das temperaturas médias mensais do solo no ano, apresentados por United States Department of Energy (2015), foram selecionados valores para profundidade de 50 cm.

Nas **Figuras 1 e 2**, são apresentados, respectivamente, valores da temperatura do solo para períodos de verão e de inverno, obtidos para profundidade de 40 cm, com as equações de Alfonsi e Sentelhas (1996) e de Azevedo e Galvami (2003), utilizando dados de temperatura do ar de Instituto Nacional de Meteorologia (2015)^a e United States Department of Energy (2015)^b. Também são indicados os valores da maior temperatura média mensal do solo em profundidade de 50 cm, obtida de United States Department of Energy (2015), além de valores das maiores temperaturas médias mensais do ar, obtidas de Instituto Nacional de Meteorologia (2015) e de United States Department of Energy (2015).

Os valores de temperatura do solo obtidos com base nas equações dos pesquisadores brasileiros

^a Para simplificação, os dados obtidos segundo Instituto Nacional de Meteorologia (2015) serão referenciados como INMET.

^b Para simplificação, os dados obtidos segundo *United States Department of Energy* (2015) serão referenciados com USDOE.

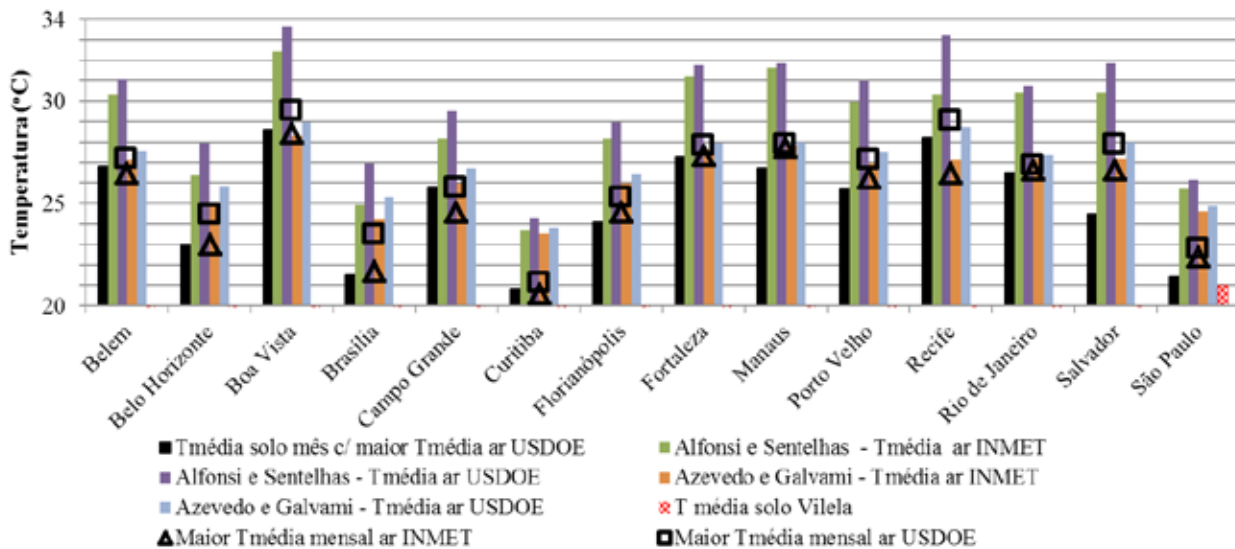


Figura 1 – Valores de temperatura do solo e do ar para o período de verão.
 Fonte: Elaborado pelos autores.

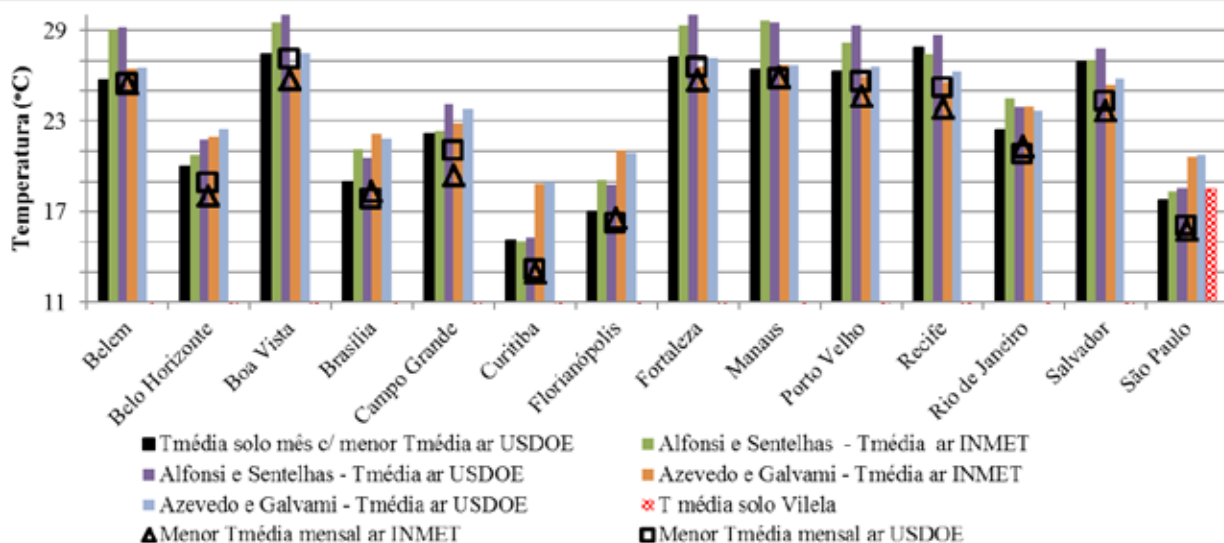


Figura 2 – Valores de temperatura do solo e do ar para o período de inverno.
 Fonte: Elaborado pelos autores.

(ALFONSI; SENTELHAS, 1996; AZEVEDO; GAVAMI, 2003) não forneceram informações adequadas para a realização de simulações, em virtude de apresentarem valores extremos ou não apresentarem uma tendência perceptível de comportamento.

Por outro lado, há uma relação entre os valores da temperatura média do solo obtida de *United*

States Department of Energy (2015) e a temperatura média do ar, obtida tanto de United States Department of Energy (2015), quanto de Instituto Nacional de Meteorologia (2015). Porém, em algumas situações há uma variação significativa, de até 2 °C entre os valores dessas fontes. Esse fator aponta a possibilidade de se utilizar a temperatura média do ar para compor a temperatura do solo em profundidade de 50 cm quando não se dispõe de dados de temperatura do solo. Todavia, é fundamental efetuar análises para identificar o efeito que uma variação desta magnitude na temperatura do solo (2 °C) pode ter no desempenho térmico de uma edificação térrea. Também é importante verificar qual seria a forma mais adequada de inserir os dados de temperatura do solo no programa de simulação. Para tanto, foram efetuadas as atividades descritas nos itens 2.1.2 e 2.1.3.

2.1.2 Efeito da temperatura do solo e sua profundidade no desempenho térmico de habitação

Foram feitas simulações computacionais de uma habitação térrea em São Paulo (COMPANHIA DE DESENVOLVIMENTO HABITACIONAL E URBANO, 1997), conforme procedimentos da NBR 15575 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013) com o programa EnergyPlus. A habitação foi exposta às condições climáticas de dias típicos de verão e de inverno (**Tabela 1**), com temperaturas do solo de 21 °C a 34 °C no verão e, de 4 °C a 18 °C no inverno, com intervalos de 2 °C (valores com duas unidades a mais que a temperatura máxima diária e duas a menos que a temperatura mínima diária, nos dias típicos de projeto). A edificação foi simulada com esses valores de temperatura superficial do solo em profundidades de 50 cm e 100 cm da superfície do solo.

Consideraram-se dois tipos de paredes: indicadas como "pesadas", com 15 cm de concreto comum e, "leves", com 1 cm de chapa cimentícia na face externa e gesso acartonado na face interna, ambas as habitações com telhado em telhas cerâmicas e forro de gesso acartonado.

2.1.3 Adequação dos dados de temperatura do solo obtidos de USDOE e da adoção de valores de Tabela 1 – Dados climáticos.

Fonte: Elaborado pelos autores.

Dia	Temperatura máxima do ar exterior (°C)	Amplitude diária do ar exterior (°C)	Temperatura bulbo úmido (°C)	Radiação solar global - horizontal (W/m ²)	Temperatura do solo (°C)	Profundidade do solo (cm)
Verão	31,9	9,2	21,3	5180	21 a 34	50 e 100
Inverno	16,2	10	13,4	4420	4 a 18	

temperatura média mensal do ar do INMET como temperatura do solo

Foi verificado se os valores da temperatura máxima e mínima média mensal do solo, obtidos de United States Department of Energy (2015) e do Instituto Nacional de Meteorologia (2015) (neste caso utilizando a temperatura média mensal do ar para compor a média mensal do solo), são adequados para efetuar simulações computacionais da resposta térmica de habitações compondo dados de dias típicos de verão e de inverno, respectivamente. Para isso, reproduziu-se, por simulações computacionais com o programa EnergyPlus, a resposta térmica de um protótipo construído no IPT, para o qual há dados medidos (temperaturas do ar externo, interno, superficiais de pisos, paredes e forro). O protótipo tem dimensões 3,3 m x 4,3 m, feito com paredes de tijolos de barro revestidos com argamassa em ambas as faces, cobertura com forro de madeira e telhado em telhas cerâmicas. Há uma janela com 1,44 m² de área de vidro simples e transparente, orientada à direção sudeste e uma porta de madeira com área de 1,68 m².

O protótipo foi simulado inserindo-se valores da temperatura do solo na superfície em contato com o piso e em profundidade de 50 cm, com dados United States Department of Energy (2015) e Instituto Nacional de Meteorologia (2015). Foram utilizados valores médios mensais da temperatura do ar e do solo, das referidas fontes, em cada mês em que foram realizadas as medições no protótipo (julho e abril), como indicado na **Tabela 2**.

2.2 Resultados

Tabela 2 – Dados climáticos.

Fonte: Elaborado pelos autores.

Dia	Temperatura máxima do ar exterior (°C)	Temperatura mínima do ar exterior (°C)	Temperatura média do ar exterior (°C)	Radiação solar global - horizontal (W/m ²)	Temperatura do solo ^c (°C)
23/abril ^a	29,0	17,1	21,8	3350 ^b	22,4 (média do solo, abril, USDOE (2015))
					19,7 (média do ar, abril, INMET (2015))
19/julho ^a	23,0	8,1	16,2	2630 ^b	17,8 (Média do solo, julho, USDOE (2015))
					15,8 (Média do ar, julho, INMET (2015))

^a Dados obtidos por medições.

^b Dados obtidos com uso do programa EnergyPlus, com modelo de céu da ASHRAE e nebulosidade de 50 %.

^c Temperatura na superfície externa e em profundidade de 50 cm. Solo com as seguintes características: condutividade térmica de 0,6 W/(m.K), massa específica de 1700 kg/m³ e calor específico de 840 J/(kg.K).

2.2.1 Efeito da temperatura do solo e sua profundidade nos resultados das simulações

Os resultados obtidos são apresentados nas **Figuras 3 e 4**, respectivamente, para o verão e para o inverno. Observa-se que nas situações em que se atribui a temperatura do solo à sua superfície, a resposta térmica da edificação é afetada de modo mais significativo em comparação com situações com profundidade de 50 cm e 100 cm, principalmente aquela com sistema construtivo leve.

2.2.2. Adequação dos dados de temperatura do solo obtidos de USDOE e do INMET

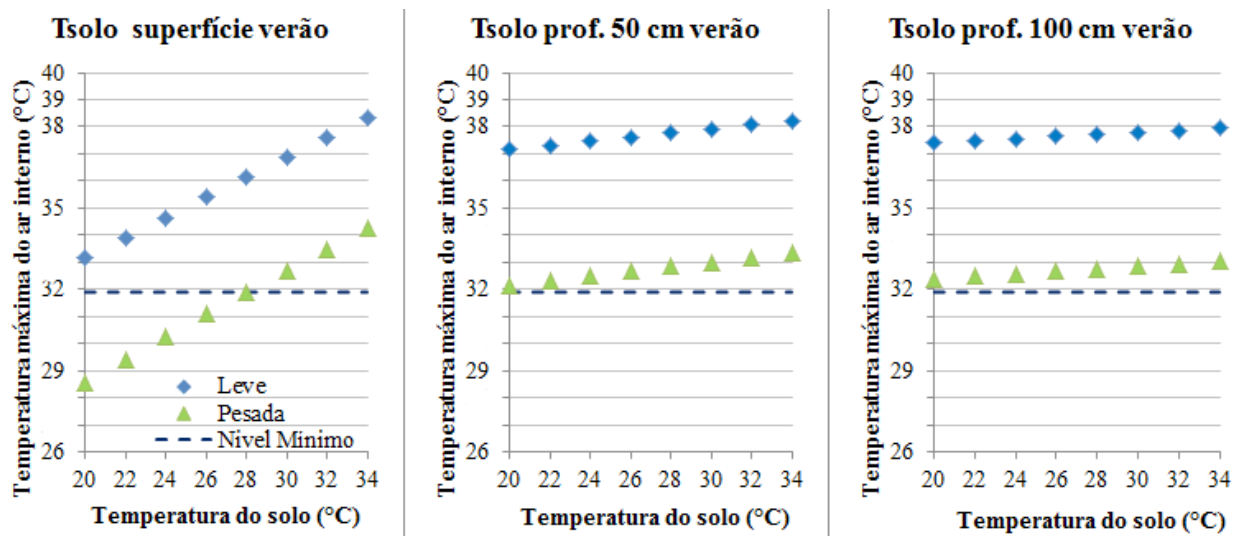


Figura 3 – Temperatura máxima do ar interior de habitação em dia típico de verão com três sistemas construtivos em função da temperatura do solo em três profundidades.

Fonte: Elaborado pelos autores.

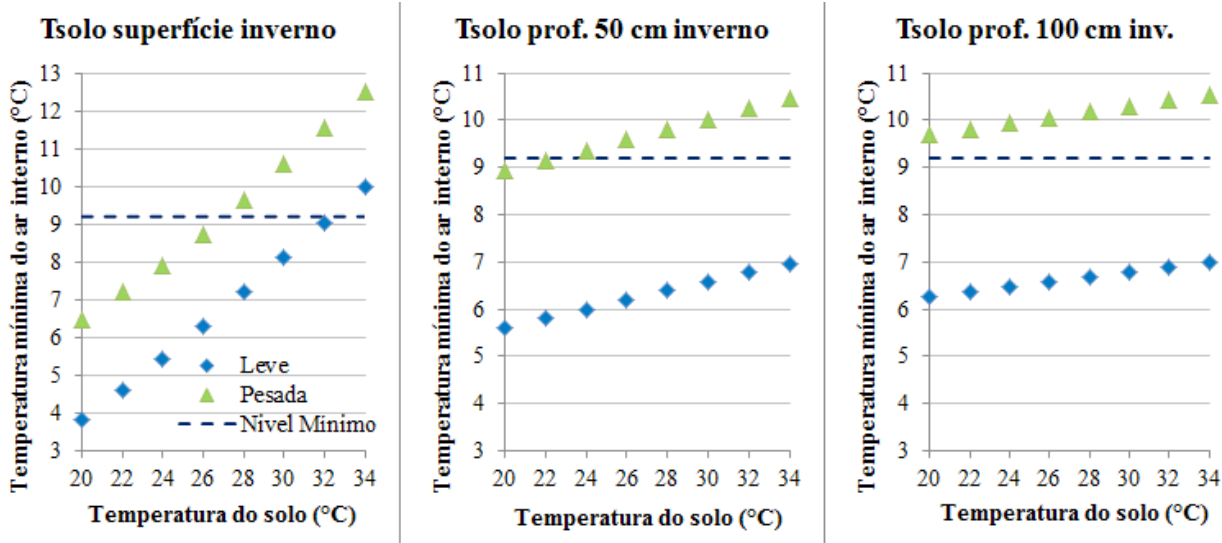


Figura 4 – Temperatura mínima do ar interior de habitação em dia típico de inverno com três sistemas construtivos em função da temperatura do solo em três profundidades.
 Fonte: Elaborado pelos autores.

Os resultados são apresentados nas Figuras 5 e 6, respectivamente, para períodos de abril e de julho. São indicados os valores das temperaturas do ar externo e do ar interno, obtida nas simulações, considerando as várias informações de temperaturas do solo e profundidade, além de dados de temperatura do ar externo, interno e superficiais do piso, obtidas nas medições.

Em abril, as temperaturas máximas do ar interior obtidas por simulações diferem dos valores medidos

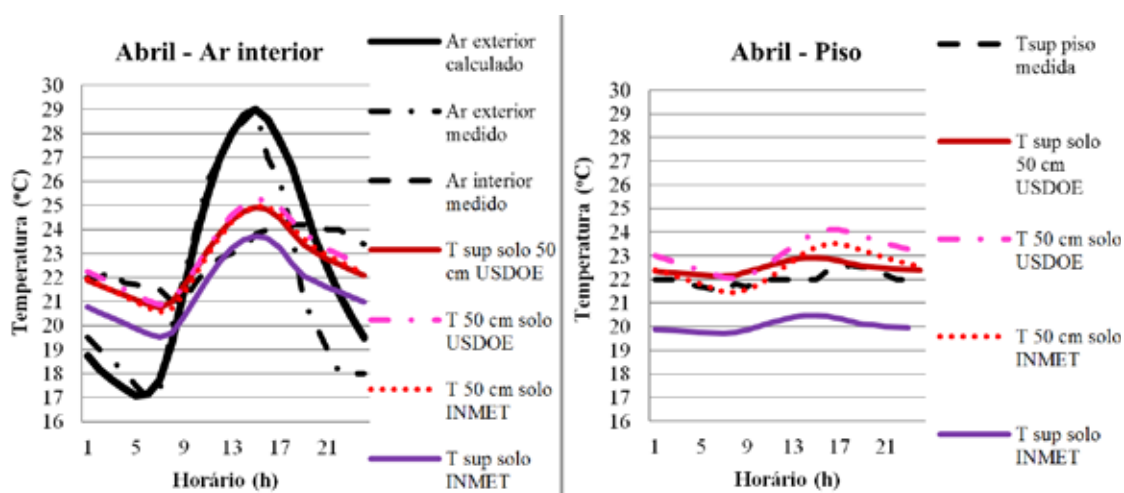


Figura 5 – Temperatura do ar (à esquerda) e do piso (à direita) em abril
 Fonte: Elaborado pelos autores.

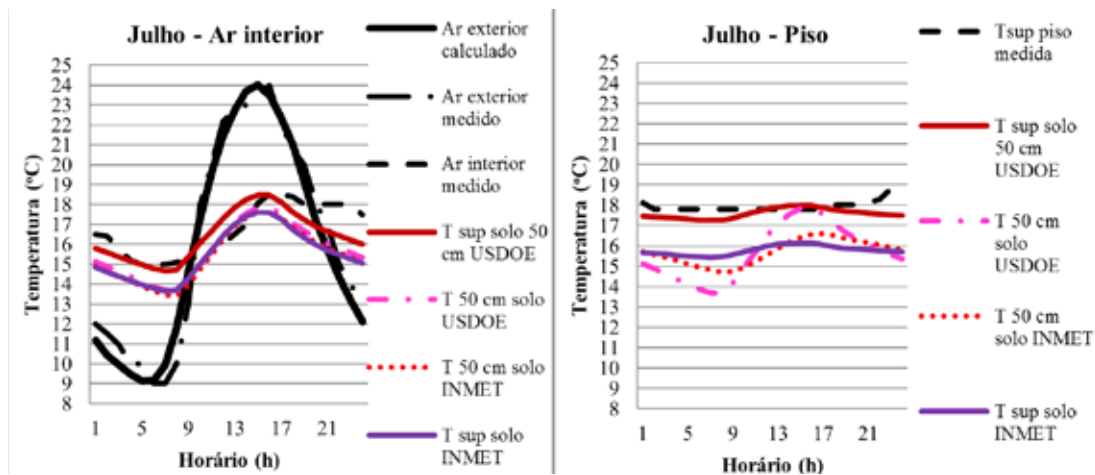


Figura 6 – Temperatura do ar (à esquerda) e do piso (à direita) em julho
 Fonte: Elaborado pelos autores.

de 0,6 °C a 1,2 °C. A temperatura superficial máxima do piso interno, nas simulações, difere dos valores medidos com variação de 0,5 °C a 1,3 °C. A maior diferença entre dados medidos e simulados é obtida com a temperatura superficial do solo de INMET.

Em julho, as temperaturas máxima e mínima do ar interior, estão mais próximas dos valores medidos, com a temperatura superficial do solo de USDOE. Nos demais casos, há uma diferença da ordem de 0,6 °C entre valores medidos e calculados da temperatura máxima do ar interior e, da ordem de 1,5 °C abaixo do valor mínimo medido. A temperatura superficial do piso interno difere dos dados medidos em até 2 °C, sendo os valores mais próximos dos medidos aqueles obtidos com a temperatura do solo de USDOE na superfície.

2.2.3 Conclusões

Quanto ao efeito da temperatura do solo e sua profundidade, observou-se que uma variação de 2 °C na temperatura do solo tem impacto pouco significativo na resposta térmica da edificação quando simulada em profundidade de 50 cm ou mais. Como os dados de temperatura média mensal obtidos do INMET apresentam uma diferença de até 2 °C dos dados de temperatura do solo obtidos do USDOE, na ausência de informações, pode-se adotar valores da temperatura média mensal do ar para compor valores da temperatura do solo nessa profundidade, sem comprometer o resultado da avaliação. Quanto aos valores da temperatura do solo, como em maior profundidade, a temperatura do solo é pouco afetada pelas condições térmicas externas, simular a temperatura do solo em profundidade de 50 cm pode ser uma opção mais adequada.

2.2.4 Valores sugeridos da temperatura do solo

Na **Tabela 3**, são apresentados valores de temperatura do solo obtidos de United States Department of Energy (2015), sendo a maior temperatura média mensal do solo para período de verão e a menor, para o inverno, em profundidade de 50 cm, adotando-se a data com tais valores nas simulações.

Para outros tipos de simulações, é possível utilizar valores da temperatura média mensal do ar obtidas do INMET, para compor valores da temperatura do solo em profundidade de 50 cm como indicado no item 2.1.1, para escolher meses representativos de verão e de inverno.

2.3 Dias típicos de projeto das Zonas Bioclimáticas 2 e 5

Tabela 3 – Dados sugeridos para a temperatura do solo de cidades brasileiras para simulações computacionais.

Fonte: Elaborado pelos autores.

Cidade	Dia típico de verão		Dia típico de inverno	
	Dia do ano	Temperatura média mensal do solo profundidade 50 cm ^a	Dia do ano	Temperatura média mensal do solo profundidade 50 cm ^a
Belém	15.02	25,7	-	-
Belo Horizonte	15.02	23,0	15.07	20,0
Boa Vista	15.09	28,6	-	-
Brasília	15.09	21,5	15.07	19,0
Campo Grande	15.01	25,8	-	-
Curitiba	15.02	20,8	15.06	15,1
Florianópolis	15.02	24,1	15.02	17,0
Fortaleza	15.01	27,3	-	-
Manaus	15.09	26,7	-	-
Porto Velho	15.10	25,7	-	-
Recife	15.03	28,2	-	-
Rio de Janeiro	15.02	26,5	-	-
Salvador	15.02	24,5	-	-
São Paulo	15.02	21,4	15.02	17,8

Nota: a Temperatura do solo em profundidade de 50 cm. Características do solo: condutividade térmica de 0,6 W/(m.K), massa específica de 1700 kg/m³ e calor específico de 840 J/(kg.K).

2.3.1 Método

Com base em dados climáticos do Instituto Nacional de Meteorologia (2015) no período de 1981 a 2011, para as cidades de São Lourenço – MG e Vitória da Conquista – BA, respectivamente, Zonas Bioclimáticas 2 e 5, e valores de radiação solar incidente no plano horizontal obtidos de Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito (2015), foram determinados dias típicos de projeto de verão e de inverno para as duas cidades.

Isso foi feito conforme o método apresentado por Akutsu e Vittorino (1991), que consiste em identificar os meses de verão e de inverno, com base nas médias das temperaturas máximas diárias e as médias das temperaturas mínimas diárias, e a determinação dos dias típicos com frequência de ocorrência de 10 %. Os valores de temperatura do solo para Vitória da Conquista foram obtidos de United States Department of Energy (2017) e, para São Lourenço, foram adotados valores da média mensal do ar.

2.3.2 Resultados e Proposta

Na **Tabela 4**, são apresentados os dias típicos de projeto de verão e de inverno determinados para as Zonas Bioclimáticas 2 e 5.

Tabela 4 – Dados de dias típicos de verão para cidades nas Zonas Bioclimáticas 2 e 5.

Fonte: Elaborado pelos autores.

Zona Bioclimática	Cidade	Dia Típico	Temperatura máxima diária (°C)	Amplitude diária da temperatura do ar (°C)	Temperatura de bulbo úmido (°C)	Radiação solar global – plano horizontal (Wh/m ²)	Temperatura média mensal do solo em prof. de 50 cm	Dia do ano
2	São Lourenço - MG	Verão	31,8	11,7	21,6	5307	23,4	15.02
		Inverno	19,2	16,6	14,0	3595	16,2	15.07
5	Vitória da Conquista - BA	Verão	31,7	10,3	21,0	5030	21,9	15.02
		Inverno	20,4	9,7	15,1	4110	20,5	15.07

2.4 Dados climáticos de cidades para avaliações no SINAT

2.4.1 Método

Foram analisados dados climáticos de cidades (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013) que constam na mesma Zona Bioclimática (considerando somente zonas com dados de mais de uma cidade), além da realização de simulações computacionais de um apartamento (COMPANHIA DE DESENVOLVIMENTO HABITACIONAL E URBANO, 1997) exposto às condições climáticas dessas cidades. O apartamento foi simulado com o programa EnergyPlus, conforme procedimentos da Norma NBR 15575 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013), sendo localizado no último pavimento de edificação, composto por paredes e lajes de 10 cm de concreto e telhado em telhas cerâmicas. São apresentados os resultados para a sala, que foram os mais críticos.

2.4.2 Resultados

Nas **Figuras 7 e 8**, são apresentados os intervalos de variação dos valores da temperatura do ar externo e os valores da radiação solar global nos dias típicos de verão, respectivamente, para cidades da Zona Bioclimática 8 e para as Zonas 3, 6 e 7, além dos dias típicos de inverno para cidades da Zona 3.

Nas **Figuras 9 e 10**, são apresentados os resultados das simulações computacionais para a sala, respectivamente para a Zona 8 e demais zonas, incluindo os valores limites para atendimento do nível "Mínimo" de desempenho térmico em cada período (verão e inverno).

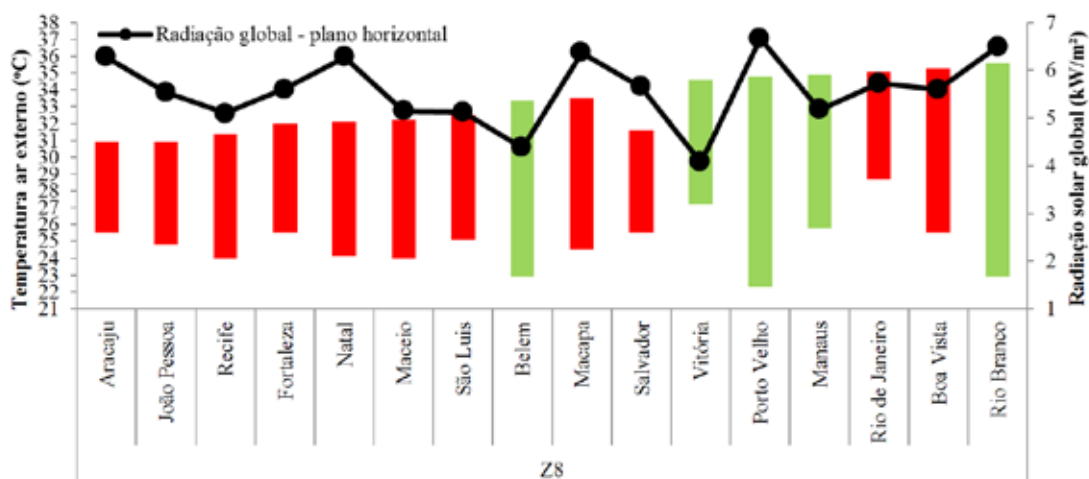


Figura 7 – Temperatura do ar externo e radiação solar global incidente no plano horizontal para cidades da Zona Bioclimática 8 constantes da norma.

Fonte: Elaborado pelos autores com dados da norma NBR 15575 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013).

Nota: Radiação solar global obtida de CRESESP-CEPEL para as cidades de Macapá e Boa Vista, pois não constam na norma NBR 15575 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013).

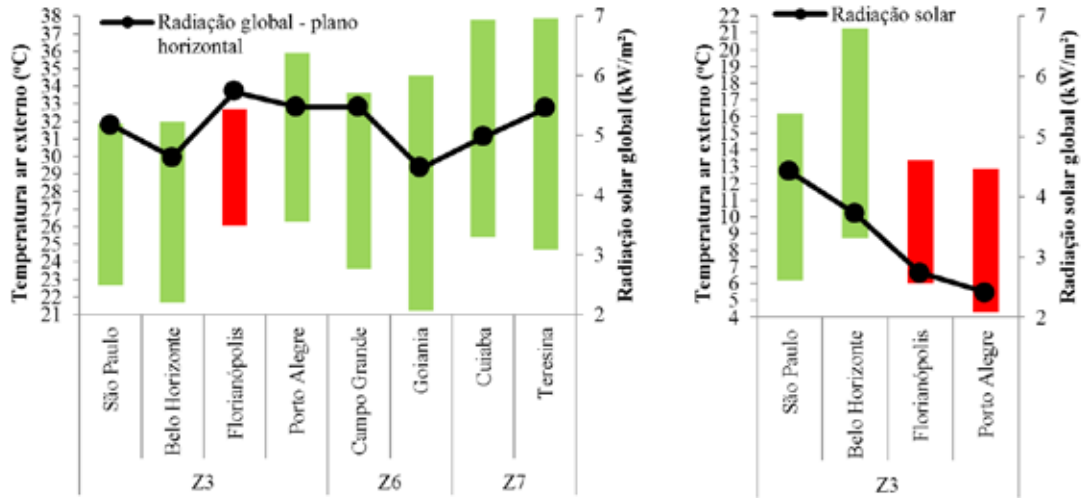


Figura 8 – Temperatura do ar externo e radiação solar global em cidades das Zonas 3, 6 e 7 constantes da norma NBR 15575 – dia típico de verão (à esquerda) e dia típico de inverno (à direita).
 Fonte: Elaborado pelos autores com dados da norma NBR 15575 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013).

Nota: Radiação solar global obtida de CRESESP-CEPEL para a cidade de Florianópolis, pois não consta na norma NBR 15575 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013).

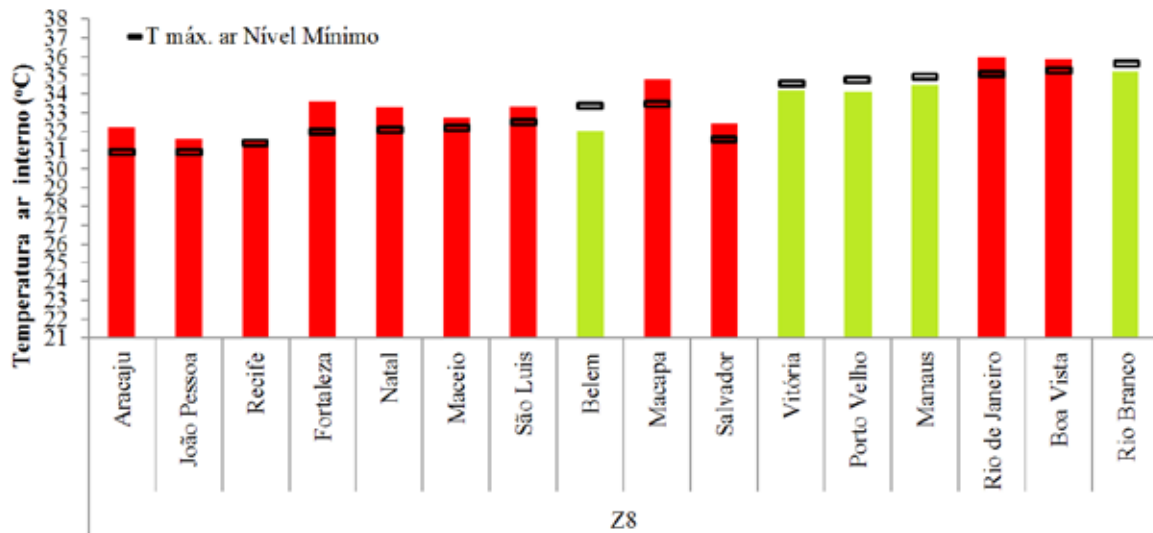


Figura 9 – Temperatura máxima do ar interno obtidos na sala em apartamentos da Zona Bioclimática 8 e valor máximo da temperatura do ar para atender nível "Mínimo".
 Fonte: Elaborado pelos autores.

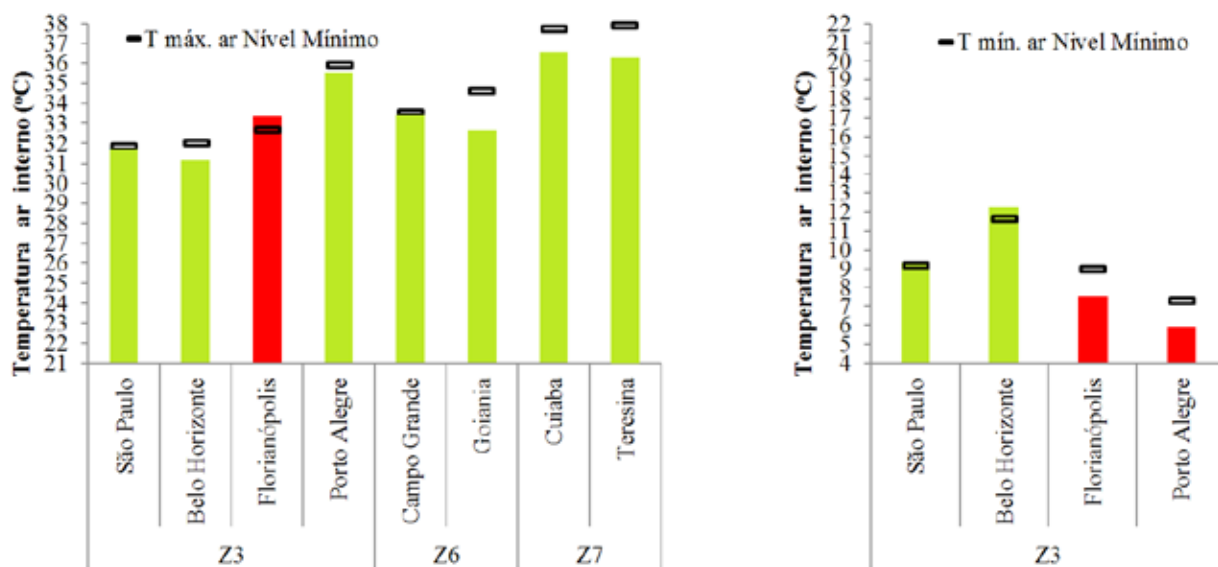


Figura 10 – Temperatura máxima do ar interno obtidos na sala em apartamentos das Zonas Bioclimáticas 3, 6 e 7 (à esquerda) e Temperatura mínima do ar nos ambientes no inverno (à direita).
Fonte: Elaborado pelos autores.

A habitação atende o nível "Mínimo" de desempenho térmico em dias típicos de verão nas cidades de Belém, Vitória, Porto Velho, Manaus e Rio Branco (destacadas em verde na **Figura 9**), que possuem duas características marcantes: amplitude diária acima de 7 °C (Belém, Porto Velho e Rio Branco) ou radiação solar global menor que 5 kW/m² (Vitória). Nas demais cidades, nas quais o dia típico de projeto é caracterizado por amplitude diária menor que 7 °C e radiação maior que 5 kW/m², a habitação não atende o nível "Mínimo" de desempenho térmico. Isso mostra que há, pelo menos, dois grupos de cidades com características climáticas diferentes do ponto de vista do desempenho térmico de uma edificação, mas que constam na mesma Zona Bioclimática 8. É evidente que seria necessário analisar as condições climáticas de mais cidades para possibilitar a delimitação de novas zonas. Entretanto, essas informações permitem ao menos estabelecer referências para se avaliar o desempenho térmico na Zona Bioclimática 8 com maior confiabilidade nos resultados, reduzindo a possibilidade de se aprovar um sistema construtivo que atende o nível "Mínimo" de desempenho térmico em toda a Zona Bioclimática 8, quando na realidade, isso não é válido para todas as cidades que fazem parte dela.

Problemas semelhantes ocorrem nas cidades da Zona Bioclimática 3, em que a habitação avaliada não atende o nível "Mínimo" de desempenho térmico em Florianópolis (no verão e inverno) e em Porto Alegre (no inverno), destacadas em vermelho na **Figura 10**. Isso indica que nessa zona há cidades com três climas diferentes. São Paulo e Belo Horizonte têm dias típicos de verão semelhantes (amplitude diária da temperatura do ar e radiação solar da mesma ordem de grandeza), embora, em São Paulo, o inverno seja mais rigoroso. Florianópolis tem um dia típico de verão com menor amplitude diária que as outras cidades (7,4 °C), o que já caracteriza um clima diferente dessas, com inverno rigoroso.

Porto Alegre apresenta grande amplitude diária e temperaturas do ar significativamente maiores no verão e menores no inverno. Os dias típicos das cidades das Zonas Bioclimáticas 6 e 7 apresentam as mesmas características, embora não seja possível garantir que outras cidades nessas zonas tem clima semelhante a elas.

2.4.3 Sugestões

Para reduzir a possibilidade de aprovar um sistema construtivo que não tenha características adequadas ao clima do local, para a Zona Bioclimática 8, podem ser escolhidas duas cidades para avaliações no âmbito do SINAT: uma com amplitude diária acima de 7 °C ou radiação solar global menor que 5 kW/m² (Belém, Vitória, Porto Velho, Manaus, Rio Branco) e outra com amplitude diária menor que 7 °C e radiação maior que 5 kW/m² (Aracaju, João Pessoa, Recife, Fortaleza, Natal, Maceió, São Luis, Macapá, Salvador, Rio de Janeiro, Boa Vista). A aprovação do sistema construtivo nas duas cidades indica maior probabilidade de atendimento do nível "Mínimo" nas demais cidades da Zona Bioclimática 8. Quanto à Zona Bioclimática 3, de modo análogo, poderiam ser adotadas duas cidades: com amplitude diária maior que 7 °C (São Paulo, Belo Horizonte e Porto Alegre) e menor ou igual a 7 °C (Florianópolis).

2.5 Outras variáveis de simulação

Foram efetuadas discussões com a Instituição de Avaliação Técnica Falcão Bauer e com a Caixa Econômica Federal visando à padronização de dados climáticos para a realização de simulações no âmbito do SINAT. Com a Caixa, especificamente, foram desenvolvidos projetos de referência para as simulações, com base nas dimensões típicas das habitações financiadas por esse órgão, bem como exigências de tamanhos de aberturas, além da padronização de aspectos inerentes ao sistema construtivo, como cores das superfícies externas de telhados e conteúdo mínimo de um relatório de avaliação de desempenho térmico.

3 Proposta de procedimentos para avaliar o desempenho térmico potencial de um sistema construtivo

Na avaliação do desempenho térmico de edificações não climatizadas pelo método detalhado, conforme a norma NBR 15575 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013), inicialmente deve-se selecionar a opção mais adequada ao objetivo da avaliação, como indicado nos itens a seguir:

- a. Identificar o desempenho térmico de uma edificação específica a ser construída em determinado terreno; e
- b. Identificar o desempenho térmico potencial de um sistema construtivo.

Para avaliar uma edificação específica, como descrito no objetivo (a), podem ser abordadas todas as circunstâncias particulares da edificação, tais como: exposição ao microclima do local, forma e parâmetros físicos e térmicos da envoltória, sua implantação, orientação solar das fachadas, condições de ventilação dos ambientes, dentre outras. A edificação pode ser analisada por simulações computacionais ou medições.

Nas simulações, pode ser utilizado tanto o modelo simplificado de ventilação natural ou modelos complexos que indiquem a eficiência da ventilação em função dos fatores geométricos da edificação, quanto à posição de aberturas e disposição de paredes. Nas medições, é necessário ter maiores cuidados para verificar qual é o rigor da avaliação, comparando as características do dia medido com os dias típicos de projeto (temperatura do ar externo, umidade relativa, velocidade do vento, radiação solar global incidente no plano horizontal), além de analisar dados do terceiro dia de uma sequência de três dias. Os resultados da avaliação são aplicáveis exclusivamente à edificação avaliada, no local considerado, não podendo ser generalizados.

Para identificar o desempenho térmico potencial de um sistema construtivo, deve ser utilizado o método detalhado por simulações computacionais previsto na norma NBR 15575 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013), além dos procedimentos complementares indicados a seguir.

3.1 Simulações

Os procedimentos padronizados de ensaio incluem: condições climáticas de cidades representativas de cada Zona Bioclimática Brasileira; orientação solar das fachadas de dormitórios e salas; cores das superfícies externas das paredes e da cobertura; condições de ocupação e de ventilação dos ambientes, além da geometria da edificação (projetos padrão de ensaio).

É necessário que seja utilizado programa de simulação computacional que apresenta a resposta térmica de edificações considerando condições transientes de trocas térmicas, levando em consideração o efeito da inércia térmica. O programa EnergyPlus é reconhecido para fazer as simulações e é de domínio público, sugerindo-se sua adoção para efetuar as simulações.

3.1.1 Condições climáticas

Devem ser consideradas as condições climáticas de dias típicos de verão e de inverno de cidades representativas das Zonas Bioclimáticas Brasileiras, de acordo com a **Tabela 5**. Deve-se adotar direção do vento perpendicular à fachada do ambiente analisado e velocidade do vento de 1 m/s, como padrão para todas as cidades representativas das Zonas Bioclimáticas.

Tabela 5 – Dados de dias típicos de verão e inverno.

Fonte: Elaborado pelos autores com dados do Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito (2015); Norma NBR 15575 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013).

Período	Zona Biocl.	Cidade	UF	Dia do ano	Temperatura do solo – prof. 50 cm (°C)	Temperatura máxima Bulbo Seco (°C)	Amplitude diária da temperatura do ar (°C)	Temperatura Bulbo Úmido (TBS máximo) (°C)	Radiação solar global incidente no plano horizontal (kW/m ²)
Verão	1	Curitiba	PR	15.02	20,8	31,4	10,2	21,3	2,77
	2	São Lourenço	MG	15.02	23,4	31,8	11,7	21,6	5,30
	3	São Paulo	SP	15.02	21,4	31,9	9,2	21,3	5,18
		Florianópolis	SC	15.02	24,1	32,7	6,6	24,4	5,73 ^a
	4	Brasília	DF	15.09	21,5	31,2	12,5	20,9	4,62
	5	Vitória da Conquista	BA	15.02	21,9	31,7	10,3	21,0	5,03
	6	Cuiabá	MT	15.10	25,7	37,8	12,4	24,8	4,97
	7	Campo Grande	MG	15.01	25,8	33,6	10	23,6	5,48
Inverno	1	Manaus	AM	15.09	26,7	34,9	9,1	26,4	5,18
		Recife	PE	15.02	28,2	31,4	7,4	24,7	5,10
	1	Curitiba	PR	15.06	15,1	12,3	11,6	11	1,66
	2	São Lourenço	MG	15.07	16,2	19,2	16,6	14,0	3,59
	3	São Paulo	SP	15.07	17,8	16,2	10	13,4	4,42
		Florianópolis	SC	15.07	17,0	13,4	7,4	13,4	2,74 ^a
	4	Brasília	DF	15.07	19,0	22,2	12,2	14,8	4,25
	5	Vitória da Conquista	BA	15.07	20,5	20,4	9,7	15,1	4,11

^a Radiação solar global de Florianópolis obtida de CRESESP-CEPEL, não consta na norma NBR 15575 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CORROSAO, 2013)

^b Temperatura do solo para ser simulada em profundidade de 50 cm. Características do solo: condutividade térmica de 0,6 W/(m.K), massa específica de 1700 kg/m³ e calor específico de 840 J/(kg.K).

Observa-se que os resultados das avaliações do desempenho térmico de edificações nas cidades indicadas na **Tabela 5** podem ser estendidos a outras cidades, desde que alocadas na mesma Zona Bioclimática considerada na avaliação. Para as Zonas Bioclimáticas que têm duas cidades indicadas, a edificação deve atender o nível "Mínimo" em ambas para que os resultados sejam estendidos às outras cidades da Zona. Caso isso não ocorra, os resultados serão válidos somente para a cidade na qual o sistema construtivo foi aprovado. Caso sejam utilizados dados geográficos e climáticos diferentes dos apresentados na **Tabela 5**, os resultados da avaliação não serão aceitos.

3.1.2 Projeto padrão de ensaio

Devem ser considerados os projetos padrão de ensaio indicados nas **Figuras 11 e 12**, que incluem casa térrea isolada e geminada, casa sobreposta e apartamento. Caso seja necessário avaliar um sobrado, pode ser analisada a casa térrea geminada, simulada com parede em contato com outra edificação idêntica ao invés de estar em contato com o solo.

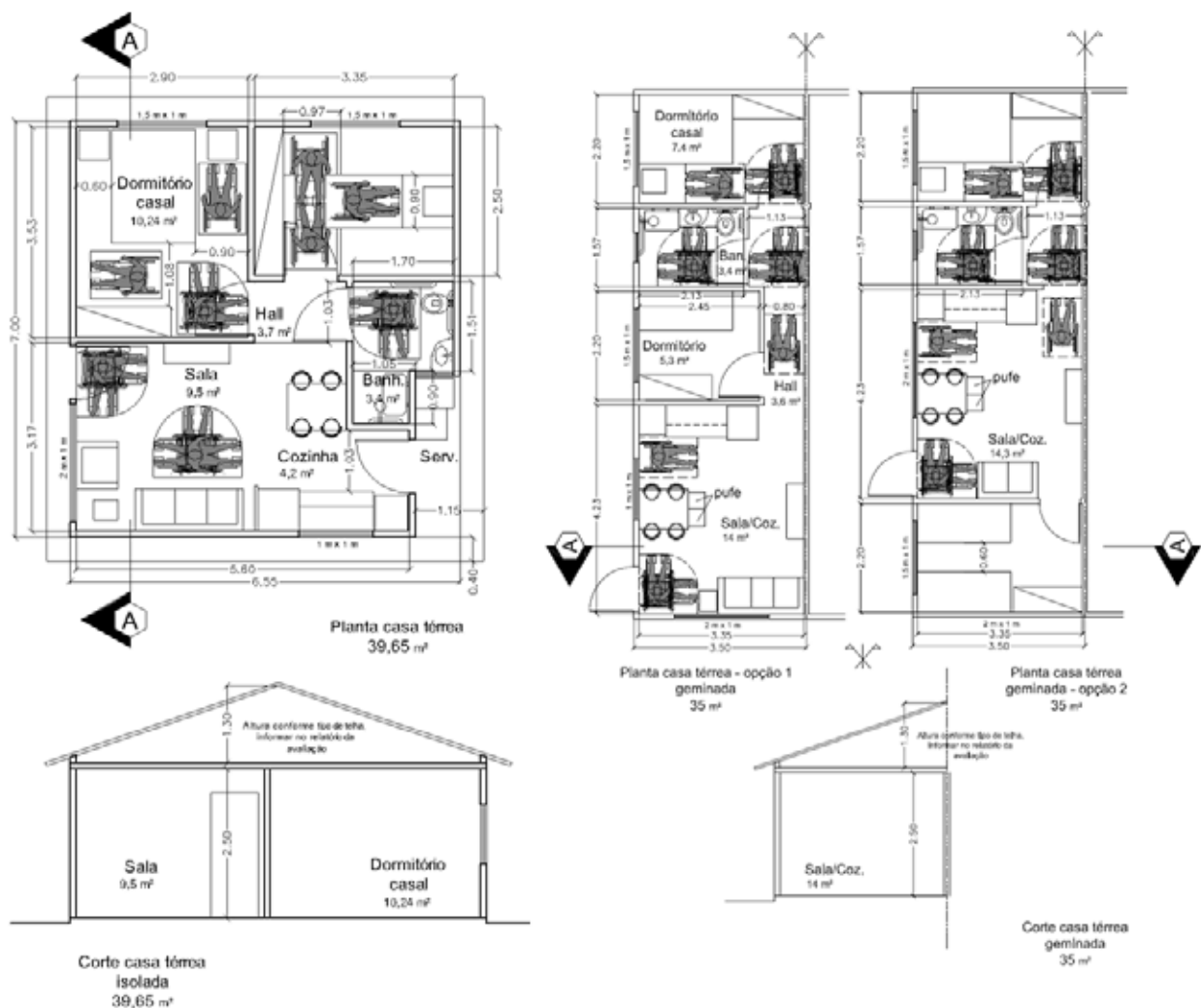


Figura 11 – Projetos padrão para casa térrea isolada e geminada.
Fonte: Elaborado pelos autores.

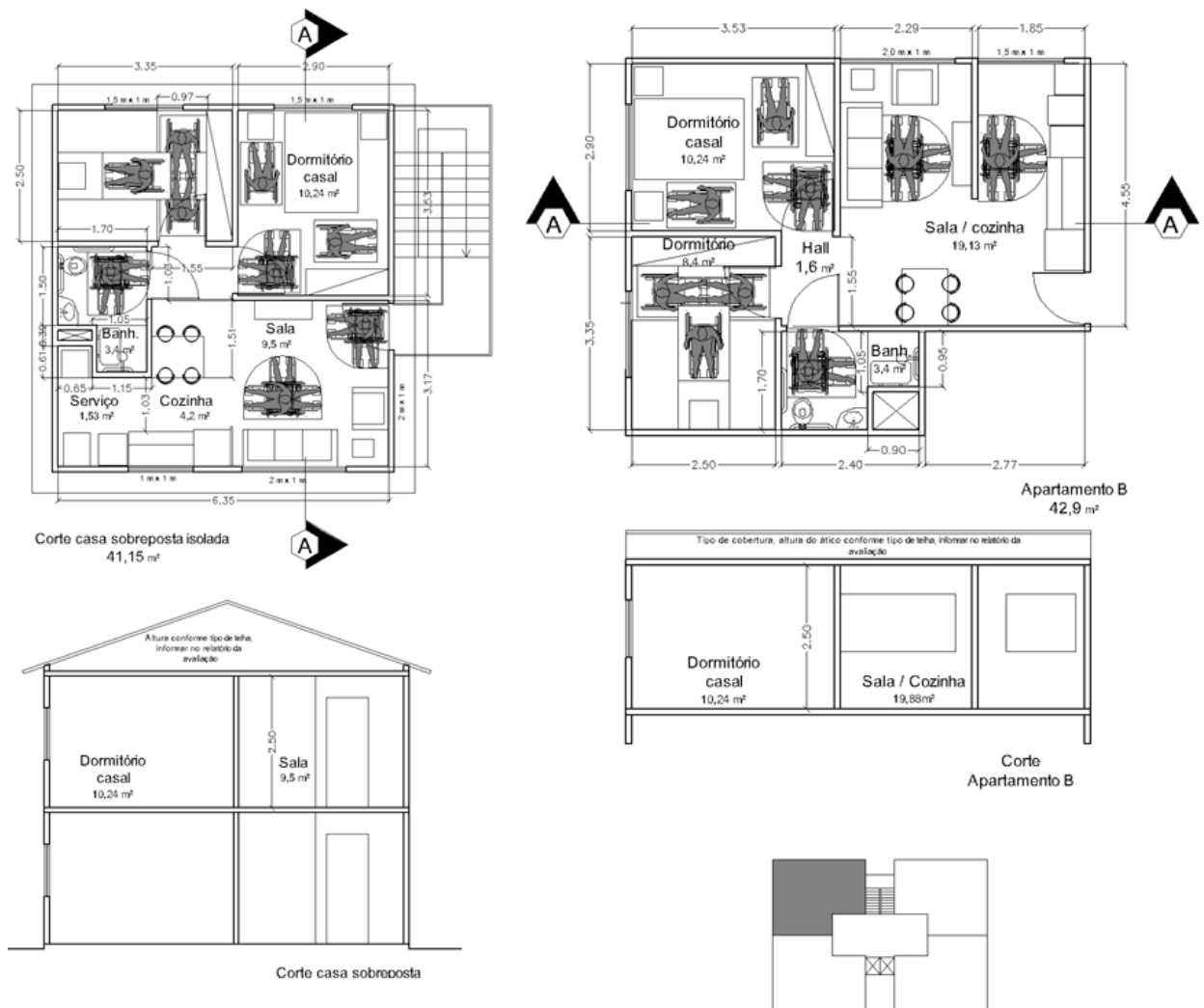


Figura 12 – Projetos padrão para casa sobreposta e apartamento.
 Fonte: Elaborado pelos autores.

3.1.3 Simulações dos ambientes

O projeto da unidade habitacional deve ser simulado por completo, com cada ambiente representando uma zona térmica. Deve-se adotar a situação mais crítica de exposição à radiação solar, como disposto a seguir:

- Apartamento ou ambiente localizado no último pavimento, com sala e dormitório em contato com a cobertura da edificação;
- Ambiente sala e ambiente dormitório com maior área envidraçada na fachada, com janela voltada para a direção Oeste e uma parede para Norte, no período de verão. No período de inverno, a janela deve ser voltada para a direção Sul e uma parede para Leste;

- c. Ambiente sala e ambiente dormitório com o maior número de paredes expostas ao clima, tanto no verão quanto no inverno; e
- d. As simulações são realizadas para os dois ambientes, sala e dormitório, posicionados individualmente na situação mais crítica. Isso significa que deve ser feita uma primeira simulação posicionando-se a sala na situação mais crítica e uma segunda simulação, posicionando-se o dormitório na situação mais crítica. Em ambas as situações, são obtidos os resultados para todos os ambientes, adotando-se, para efeito da análise, os resultados mais desfavoráveis.

3.1.4 Absortância à radiação solar de superfícies

Considerar superfícies externas das fachadas em cores claras, médias e escuras, com absortância à radiação solar de 0,3, 0,5 e 0,7, respectivamente e superfícies externas das telhas do telhado conforme indicado na **Tabela 6**.

Tabela 6 – Absortância à radiação solar de superfícies externas de telhados ou coberturas.

Fonte: Elaborados pelos autores.

Tipo de cobertura ou cor	Absortância da superfície externa da cobertura
Cerâmica	0,7
Fibrocimento	0,7
Concreto	0,7
Cobertura em cor clara, com absortância de 0,3	0,5
Cobertura em cor média, com absortância de 0,5	0,7
Cobertura em cor escura, com absortância de 0,7	0,9

Nota: É obrigatória a apresentação de resultados de simulações considerando as absortâncias das superfícies da cobertura previstas nesta tabela, que representam condições que poderão ser encontradas em coberturas "envelhecidas".

3.1.5 Ático

As simulações devem ser realizadas considerando ático "não ventilado", com as dimensões previstas nos projetos padrão. Caso o sistema construtivo da cobertura necessite de uma inclinação diferente daquelas indicadas nos projetos, essa informação deve ser destacada no relatório da avaliação, incluindo as dimensões utilizadas.

3.1.6 Pé direito

Utilizar o pé direito indicado nos projetos padrão. Caso o sistema construtivo não contemple forro, adotar a inclinação do telhado do projeto padrão. Para coberturas sem forro e com inclinação diferente da prevista no projeto padrão, essa informação deve ser destacada no relatório da avaliação, incluindo as dimensões utilizadas.

3.1.7 Ocupação

Os recintos devem ser simulados sem a presença de pessoas, equipamentos e iluminação, de modo a se obter informações somente da resposta térmica da edificação decorrente da sua interação com o clima do local.

3.1.8 Sombreamento de janelas e ventilação de ambientes

Os recintos devem ser simulados considerando as quatro situações abaixo apresentadas para o período de verão e a situação apresentada para o período de inverno. Devem ser utilizados os modelos de ventilação simplificados que permitem a inclusão do número de renovações do ar nos ambientes padronizado na norma NBR 15575 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013). Ressalta-se a importância desse fator para padronização do ensaio, pois tais modelos não levam em conta especificidades da geometria.

Período de verão

- a. Ambiente com ventilação a uma taxa de uma renovação do volume de ar do ambiente por hora, durante as 24 horas do dia, com janelas sem sombreamento. Considerar a área total da janela como envidraçada, ou seja, sem sombreamento. Esta condição de simulação é denominada como condição padrão, "PADRÃO";
- b. Janelas sombreadas, ou seja, com proteção solar como cortinas ou outros elementos, que impeçam a entrada de radiação solar direta ou que reduzam em 50 % a incidência da radiação solar global no ambiente. Considerar o ambiente com ventilação a uma taxa de uma renovação do volume de ar do ambiente por hora, durante as 24 horas do dia. Esta condição de simulação é denominada como condição com sombreamento, "SOMB";
- c. Ambiente ventilado a uma taxa de cinco renovações do volume de ar do ambiente por hora, durante as 24 horas do dia. Considerar a janela com sua área total envidraçada, ou seja, sem sombreamento. Esta condição de simulação é denominada como condição com ventilação, "VENT"; e
- d. Simulação com a combinação das duas opções anteriormente expostas em "b" e "c", ou seja, condição com sombreamento e ventilação, denominada como "SOMB + VENT". Considerar, portanto, ambiente ventilado a uma taxa de cinco renovações do volume de ar do ambiente por hora e janelas sombreadas, ou seja, com proteção solar que impeça a entrada de radiação solar direta ou reduzam em 50 % a incidência da radiação solar global no ambiente.

Período de inverno

Ambiente com ventilação a uma taxa de uma renovação do volume de ar do ambiente por hora, durante as 24 horas do dia, com janelas sem sombreamento, ou seja, considerar a janela com sua área total envidraçada; esta condição de simulação é denominada como condição padrão, "PADRÃO".

3.1.9 Análise dos resultados

Analisar a resposta térmica tanto de salas como de dormitórios, ou seja, dos ambientes de ocupação prolongada, que apresentem condições mais críticas de exposição à radiação solar no período considerado.

Para que se considere que a habitação atende aos critérios referentes ao nível mínimo de desempenho térmico previsto na norma NBR 15575 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013), é necessário que salas e dormitórios atendam o nível mínimo de desempenho térmico no verão e no inverno, como disposto a seguir:

- a. Atendimento do nível de desempenho térmico mínimo no verão: o nível mínimo (M) é atendido quando o valor máximo diário da temperatura do ar interior é menor ou igual ao valor máximo diário da temperatura do ar exterior; e
- b. Atendimento do nível de desempenho térmico mínimo no inverno: o nível mínimo (M) é atendido quando o valor mínimo diário da temperatura do ar interior é maior ou igual ao valor mínimo diário da temperatura do ar exterior acrescido de 3 °C.

Para informações sobre os critérios referentes aos outros níveis de desempenho térmico, consultar o Anexo E da parte 1 da norma NBR 15575 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013).

3.1.10 Informações básicas do relatório da avaliação

- a. Projeto arquitetônico da edificação, incluindo plantas, cortes e vistas. Os cortes devem apresentar seções do ático, se houver;
- b. Descrição do sistema construtivo e da edificação considerada (paredes, cobertura, pisos, janelas, portas.) destacando detalhes das paredes, de seus componentes e revestimentos, cor da cobertura, pé direito, área envidraçada na fachada em relação à área de piso dos ambientes (**Tabela 7**);
- c. Detalhamento do sistema construtivo, disposição e espessuras de camadas;
- d. Propriedades térmicas e físicas dos materiais, que compõem o sistema construtivo, como condutividade térmica, calor específico, massa específica e emissividade das superfícies;
- e. Descrição do método utilizado na avaliação conforma a norma NBR 15575 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013);
- f. Apresentação de tabelas com os resultados do atendimento dos critérios referentes aos níveis de desempenho térmico da habitação no período de verão e no período de inverno (**Tabelas 8 e 9**). Deve haver uma legenda com a indicação das cores que representam os níveis de desempenho térmico;
- g. Indicação do resultado final da avaliação em uma tabela com o resumo de todas as condições que proporcionam o atendimento dos níveis de desempenho, como indicado no exemplo da **Tabela 10**; e
- h. Conclusão com a indicação clara do atendimento ou não dos critérios referentes aos níveis de desempenho térmico constantes na norma. Assinatura de um responsável técnico.

Tabela 7 – Área envidraçada na fachada dos ambientes por tipologia.

Fonte: Elaborado pelos autores.

Ambiente	Casa Térrea	Casa térrea geminada	Casa Sobreposta	Apartamento
Dormitório Casal	15 %	20 %	15 %	15 %
Dormitório Solteiro	18 %	28 %	18 %	18 %
Sala e Cozinha	22 %	21 %	22 %	18 %

Tabela 8 – Resultados da avaliação do desempenho térmico da edificação no verão.

Fonte: Elaborado pelos autores.

Zona Biocl.	Temperatura máxima ar exterior	Cor da parede exterior	Dormitório / Condição				Sala / Condição			
			CP	Sombreamento	Ventilação	Sombreamento + Ventilação	CP	Sombreamento	Ventilação	Sombreamento + Ventilação
X	Valor	Clara	valor	valor	valor	valor	valor	valor	valor	valor
		Média	valor	valor	valor	valor	valor	valor	valor	valor
		Escura	valor	valor	valor	valor	valor	valor	valor	valor
...	Valor	Clara	valor	valor	valor	valor	valor	valor	valor	valor
		Média	valor	valor	valor	valor	valor	valor	valor	valor
		Escura	valor	valor	valor	valor	valor	valor	valor	valor

Legenda: Vermelho: nível de desempenho térmico abaixo do "Mínimo";

Amarelo: nível de desempenho térmico "Mínimo";

Verde: nível de desempenho térmico "Intermediário";

Azul: nível de desempenho térmico "Superior".

3.1.11 Informações básicas do DATEC

O DATEC deve conter as tabelas com o resultado das condições nas quais a habitação atende, pelo menos, o nível "Mínimo", além de uma descrição sucinta da tipologia e características da habitação avaliada, incluindo a cor da cobertura, altura do ático se houver, pé direito, área envidraçada na fachada em relação à área de piso dos ambientes. A avaliação será válida somente para edificações com as características descritas no DATEC. Caso o construtor necessite fazer uma habitação com um projeto com maior área envidraçada na fachada ou cor mais escura na cobertura, por exemplo, será necessário fazer uma nova avaliação do projeto específico.

Tabela 9 – Resultados da avaliação do desempenho térmico da edificação no inverno.

Fonte: Elaborado pelos autores.

Zona Bioclimática	Temperatura máxima ar exterior	Cor da parede exterior	Dormitório / Condição	Sala / Condição
			CP	CP
1	Valor	Clara	valor	valor
		Média	valor	valor
		Escura	valor	valor
...	Valor	Clara	valor	valor
		Média	valor	valor
		Escura	valor	valor

Legenda: Vermelho: nível de desempenho térmico abaixo do "Mínimo";

Amarelo: nível de desempenho térmico "Mínimo";

Verde: nível de desempenho térmico "Intermediário";

Azul: nível de desempenho térmico "Superior".

Tabela 10 – Resumo dos resultados da avaliação do desempenho térmico da edificação com indicação do atendimento ao nível "Mínimo" de desempenho.

Fonte: Elaborado pelos autores.

Zona Bioclimática	Cor do acabamento externo das paredes			
	Condição padrão	Com sombreamento	Com ventilação	Com sombreamento e ventilação
1	Atende com cor clara ou média	Atende com cor clara ou média	Atende com cor clara ou média	Atende com qualquer cor
...	Atende com qualquer cor	Atende com qualquer cor	Atende com qualquer cor	Atende com qualquer cor
...

4 Agradecimentos

Os autores agradecem à FINEP – Inovação e Pesquisa pelo financiamento da pesquisa da qual esta publicação faz parte.

5 Referências

- AKUTSU, M.; VITTORINO, F. Proposta de procedimentos para o tratamento de dados climáticos. In: ENCONTRO NACIONAL DE NORMALIZAÇÃO LIGADA AO USO RACIONAL DE ENERGIA E AO CONFORTO AMBIENTAL EM EDIFICAÇÕES, 1990. Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: [s. n.], 1991.
- ALFONSI, R. R.; SENTELHAS, P. C. Estimativa da temperatura do solo através da temperatura do ar em abrigo meteorológico. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 4, n. 2, p. 57-61, 1996.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220**: Desempenho Térmico de Edificações. Rio de Janeiro, 2008.
- _____. **NBR 15575**: Edifícios Habitacionais – Desempenho. Rio de Janeiro, 2013.
- AZEVEDO, T. R.; GAVANI, E. Ajuste do ciclo médio mensal horário da temperatura do solo em função da temperatura do ar. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 11, n. 2, p. 123-130, 2003.
- CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO BRITO – CRESESB. **Dados de radiação solar**. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/>>. Acesso em 12 jan. 2015.
- COMPANHIA DE DESENVOLVIMENTO HABITACIONAL E URBANO. Casas térreas e sobrados. In: **Caderno de Tipologias**. São Paulo: CDHU, 1997. 41 p.
- COSTA, A. O. L.; GODOY, H. Contribuição para o conhecimento do clima do solo de Ribeirão Preto, SP. **Bragantia**, Campinas, v. 21, p. 689-742, 1962.
- FLORIDES, G.; KALOGIROU, S. Measurements of ground temperature at various depths. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SUSTAINABLE ENERGY, 3., 2004, Nottingham. **Proceedings...** Nottingham: [s. n.], 2004. (Technologies on CD-ROM, Nottingham, UK).
- GOEDERT, C. O. Temperatura do planossolo em Pelotas, RS. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 6, p. 9-11, 1971.
- INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA – INMET. **Normais Climatológicas do período de 1961 – 1990**. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/>>. Acesso em: 10 jan. 2015.
- KUSUDA, T.; ACHENBACH, P. R. Earth temperature and thermal diffusivity at selected stations in the

United States. **ASHRAE Transactions**, v. 71, part 1, 1965.

VILELA, M. M. **Estudo de método experimental para determinar a potencialidade do uso de energia geotérmica a baixa profundidade**. 2004. 278 f. Tese (Doutorado) – Programa Interunidades de Pós-graduação em Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY. **ENERGYPLUS, Energy Simulation Software** – Energy Efficiency and Renewable Energy – Building Technologies Program. Disponível em: <<https://energyplus.net/>>. Acesso em: 10 jan. 2015.

_____. **ENERGYPLUS, Energy Simulation Software** – Energy Efficiency and Renewable Energy – Building Technologies Program. Disponível em: <<https://energyplus.net/>>. Acesso em: 15 fev. 2017.

Estudo da microestrutura de solidificação em função da taxa de resfriamento de ligas Nd-Fe-B para ímãs sinterizados

Study of the solidification microstructure as a function of the cooling rate in Nd-Fe-B alloys for sintered magnets

João Ricardo Filipini da Silveira^a, Thiago Pires Nagasima^b

^a Centro de Tecnologia Em Metalurgia e Materiais, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S. A., São Paulo-SP, Brasil

^b Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo-SP, Brasil

*E-mail: joaorfs@ipt.br

Palavras-chave:
solidificação; terras raras;
Nd-Fe-B; nucleação;
crescimento.

Keywords:
Solidification, rare-earths,
Nd-Fe-B, nucleation, growth

Resumo

Foi realizado um experimento de solidificação da liga $Nd_{15}Fe_{77,5}B_{7,5}$ em forno de indução a vácuo, com atmosfera de argônio, vazando-se o metal sobre uma coquilha de cobre refrigerada a água, com objetivo de avaliar o efeito da taxa de resfriamento na microestrutura de solidificação. A medição das temperaturas ao longo do tempo foi feita em termopares às alturas de 1 mm, 7 mm e 31 mm da base. A análise das curvas de resfriamento e da microestrutura do material mostra que a formação de Fe- α é inibida apenas em super-resfriamentos relativamente altos e, conseqüente, solidificação rápida, em acordo com a literatura. A análise química mostrou que a perda de Nd por evaporação é baixa e que os contaminantes são relativamente parecidos com os de ligas comerciais, excetuando-se o Si, que pode ter aparecido devido à reatividade do banho líquido com o cadinho de alumina-silica.

Abstract

A solidification experiment with an alloy with composition $Nd_{15}Fe_{77,5}B_{7,5}$ was performed under argon atmosphere using a vacuum induction furnace, by pouring the liquid metal onto a water-cooled copper chill, aiming at evaluating the effect of the cooling rate on the solidification microstructure. Temperature measurements were conducted throughout the experiment with thermo couples placed at the heights of 1 mm, 7 mm and 31 mm from the chill base. The analysis of the temperature curves and the material's microstructure showed that the formation of alpha-iron is inhibited only with a relatively super high cooling and, consequently, with high solidification rates, in accordance with the literature. The chemical analysis revealed that the loss of Nd by evaporation is negligible and

that most contaminants present are similar to those of commercial alloys, except for Si, which may have originated from the reaction of the liquid metal with the alumina-silica crucible.

1 Introdução

Ímãs permanentes de neodímio-ferro-boro, ditos superímãs, são utilizados em diversos equipamentos, tais como geradores eólicos, motores elétricos (incluindo veículos elétricos e híbridos), fones de ouvido e discos rígidos. As propriedades magnéticas superiores desse composto, ou seja, a maior densidade de campo magnético gerado e maior resistência à desmagnetização quando comparadas com ímãs de ferrite, permitem que os equipamentos tenham dimensões reduzidas e melhor desempenho do que os feitos com ímãs tradicionais.

Embora o Brasil tenha 17 % das reservas mundiais de terras raras do mundo, apenas atrás da China, que detém 44 % das reservas, o mercado mundial de elementos de terras raras (ETR) é dominado pelos fornecedores chineses com 85,2 % da produção, como mostrado na **Tabela 1** (ANDRADE, 2016). Frente à imposição de cotas de exportação para ETR pelo governo chinês em 2010, ocorreu uma alta de preços que despertou interesse internacional por este mercado. Nesse cenário, diversos países, como o Brasil, passaram a ter investimentos novos para a exploração de suas reservas de ETR.

Tabela 1 – Reserva e produção mundial de Elementos de Terras Raras.

Discriminação	Reservas (10 ³ t)		Produção (t)	
	2014	2013	2014	%
Países				
Brasil	22000	600	0	0
China	55000	95000	95000	85,2
USA	1800	5500	7000	6,3
Austrália	3200	2000	2500	2,2
Índia	3100	2900	3000	2,7
Malásia	30	180	200	0,2
Rússia	(1)	2500	2500	2,2
Tailândia	n/d	800	1100	1,0
Vietnã	(1)	220	200	0,2
Outros Países	41000	n/d	n/d	n/d
TOTAL	126130	109700	111500	100

Fonte: United States Geological Survey (2015 apud ANDRADE, 2016, p. 108).

(1) Incluídas em outros países; n/d: não disponível ou desconsiderado.

A Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração - CBMM, que explora nióbio em sua mina de Araxá, MG, cujo minério contém terras raras, desenvolveu o processo de concentração do mineral de ETR com capacidade de 3000 t/ano além da separação dos diferentes óxidos de terras raras para produzir o óxido de didímio (mistura de neodímio e praseodímio) com capacidade de 3 t/ano.

Desde 2014, o Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A. - IPT vem desenvolvendo projetos em parceria com a CBMM com o apoio da Empresa Brasileira de Pesquisa e Inovação Industrial, Embrapii, para investigar as duas etapas seguintes da cadeia de produção dos ímãs de Nd-Fe-B: a redução do óxido de didímio e a solidificação da liga Nd-Fe-B de forma que possa ser utilizada para a fabricação de ímãs sinterizados (FERREIRA NETO et al., 2016).

Em confluência com esses projetos, está a participação do IPT no Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia de Processamento e Aplicação Terras Raras na Indústria de Alta Tecnologia, (INCT - PATRIA), pesquisando, além de outros temas, a solidificação rápida de ligas do sistema Nd-Fe-B.

O composto $Nd_2Fe_{14}B$, presente nos ímãs de terras raras, é fortemente anisotrópico com relação às suas propriedades magnéticas. Por este motivo, uma das etapas na fabricação de ímãs sintetizados é o alinhamento de partículas da liga moída, de forma que a orientação cristalográfica com melhores propriedades de cada partícula esteja alinhada com o eixo da peça.

Somado a isto, o tamanho de partícula impacta no tamanho de grão final do ímã, que afeta sua resistência à desmagnetização. Desta forma, a liga deve ser solidificada de forma a gerar uma microestrutura que após as etapas de hidretação e moagem resulte em partículas pequenas e monocristalinas do composto $Nd_2Fe_{14}B$.

Algumas dificuldades na solidificação dessa liga envolvem a possível precipitação de Fe gama (que se converte em Fe alfa a temperatura ambiente) e que possui efeito deletério para as propriedades do ímã, além da morfologia incorreta da fase Φ (composto $Nd_2Fe_{14}B$) que possa exigir maior gasto de energia, tempo de moagem e risco de oxidação do material para chegar ao tamanho de partícula desejado.

O recurso industrial para a produção da liga com microestrutura adequada para a produção de ímãs de alto produto energético máximo (BERNARDI et al., 1998) é a solidificação rápida em tiras (*strip casting*). O processo consiste no vazamento de um filete de metal líquido sobre um rolo refrigerado em movimento (**Figura 1**).

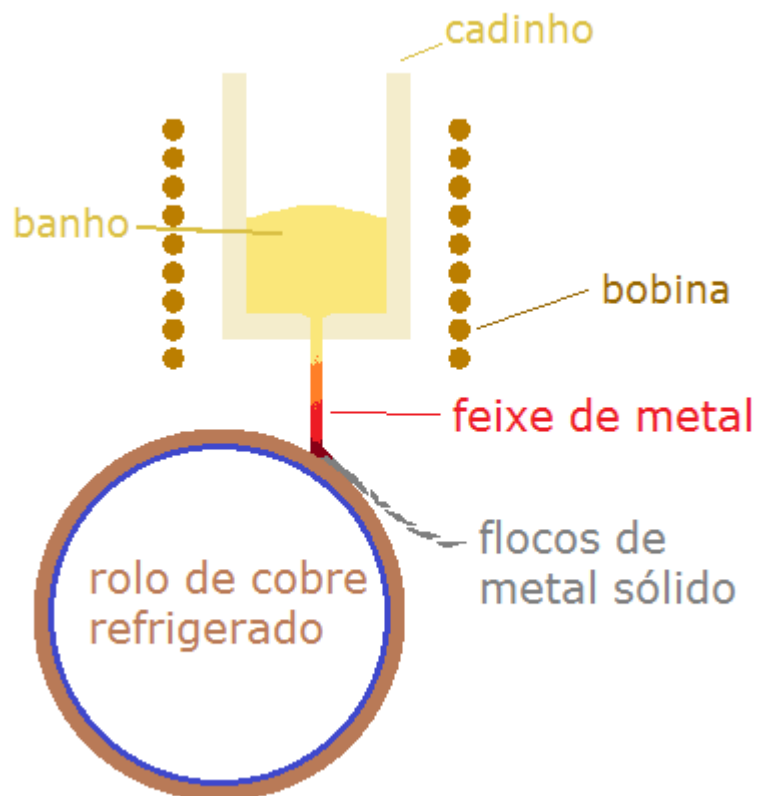


Figura 1 – Desenho esquemático de um sistema de solidificação em tiras com um rolo.
Fonte: Elaborado pelos autores.

2 Procedimento metodológico

Foi realizada a solidificação em forno de indução a vácuo sob atmosfera de Argônio de 2 kg de liga com composição nominal $Nd_{15}Fe_{77,5}B_{7,5}$ com o objetivo de analisar a microestrutura formada em função da taxa de resfriamento.

Foram realizadas duas evacuações do forno até 10^{-2} Pa seguidas, cada uma, pelo preenchimento do forno com argônio até uma pressão de $0,7 \times 10^5$ Pa com o objetivo de eliminar qualquer presença de gás oxigênio ou vapor de água que pudesse oxidar o banho durante a fusão, dada a altíssima reatividade do neodímio metálico.

Já sob atmosfera inerte, pedaços de Fe puro, conjuntamente com liga ferro-boro (com 14 % B em massa) foram fundidos em cadinho de alumina através do aquecimento por bobina de indução a uma temperatura de aproximadamente 1530 °C, controlada por pirômetro ótico. A seguir, um lingote de Nd metálico foi adicionado ao banho e a sua temperatura foi mantida brevemente a 1500 °C, antes de se reduzir a potência do forno para que a temperatura começasse a cair. Ao atingir 1370 °C,

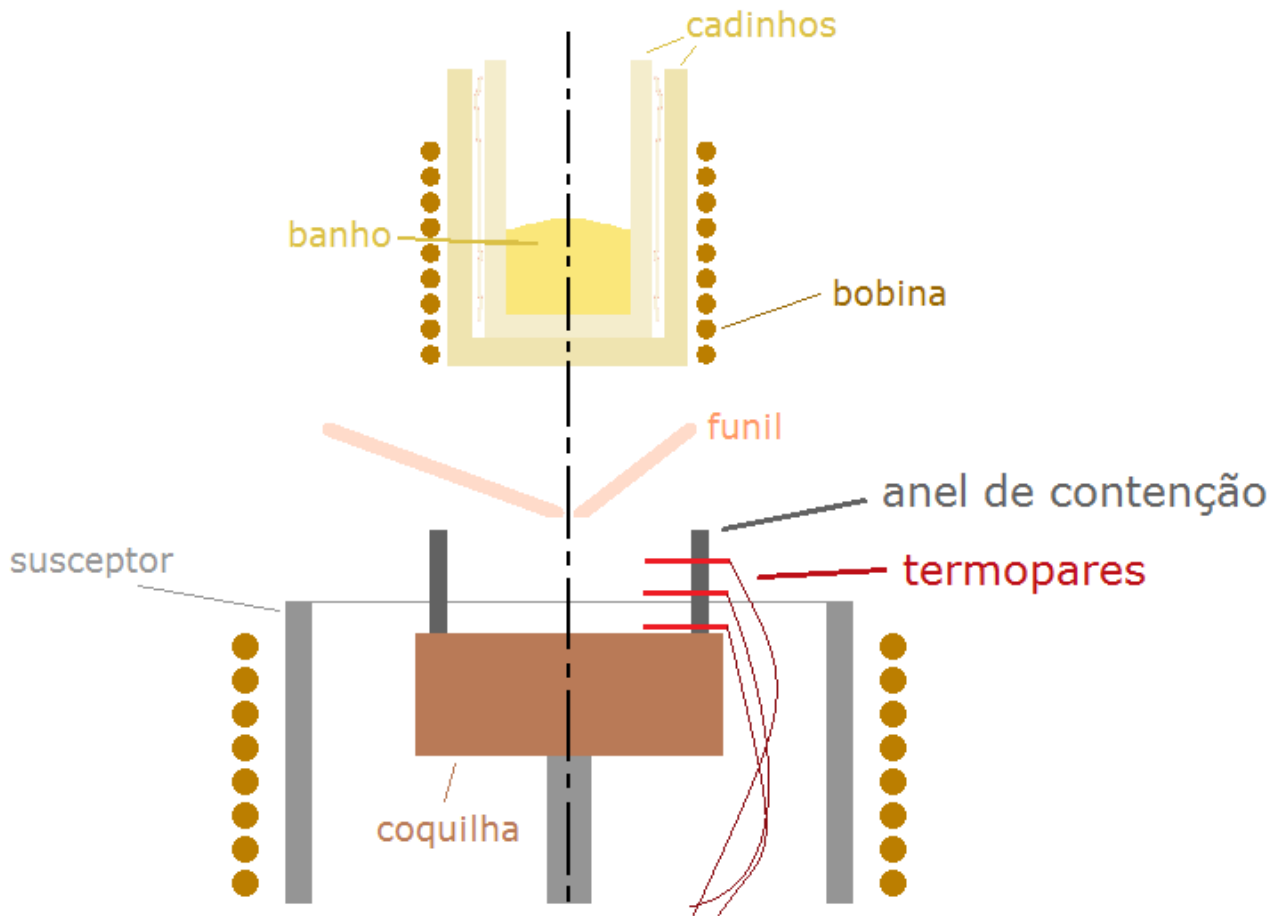


Figura 2 – Desenho esquemático da montagem de solidificação.

Fonte: Elaborado pelos autores.

o metal líquido foi vazado, vertendo-se o cadinho sobre uma coquilha de cobre refrigerada a água no interior de um anel de alumina com termopares afixados a sua parede, conforme a **Figura 2**.

A casca cerâmica de alumina utilizada para conter o metal líquido possuía 88 mm de diâmetro interno e foi furada nas alturas de 1 mm, 7 mm e 31 mm a partir da base para acomodar os termopares, de acordo com a **Figura 3**.

Para análise microestrutural do material fundido, duas amostras foram retiradas da face longitudinal, no plano coincidente com o eixo central do cilindro, uma logo acima da outra, cobrindo toda a altura do cilindro, numa posição radial de forma que o centro das amostras coincidissem com um raio de 29 mm, que é uma posição simétrica àquela ocupada pelos termopares durante a solidificação.



Figura 3 – Termopares afixados a parede do anel de contenção de alumina.

Fonte: Elaborado pelos autores.

As amostras foram embutidas em resina baquelite, lixadas em lixas de carbetto de silício com granulometria progressivamente mais fina, polidas em pano de polimento com adição de pasta de diamante e finalmente com sílica coloidal. Elas foram então analisadas em microscópio ótico de luz polarizada com um ângulo de aproximadamente 95° entre o polarizador e detector, e, além disso, em microscópio eletrônico de varredura (MEV) sob modo de elétrons retroespalhados (contraste de composição química). Foi feita uma análise química por espectroscopia de energia dispersiva (EDS) para identificação das fases e foi utilizado o programa de código livre para análise de imagens ImageJ para quantificação das fases ao longo da altura na amostra.

Para a análise de imagens foram fotografados campos consecutivos ao longo de toda a altura do lingote, com um aumento de 500x. A fração volumétrica de ferro alfa foi estimada a partir da fração de área ocupada pelo ferro nas imagens calculada separando-se as fases de acordo com a tonalidade.

A análise química dos elementos majoritários presentes na liga produzida foi feita por espectroscopia de emissão atômica por plasma acoplado indutivamente (ICP-OES). A matéria prima utilizada bem como os contaminantes encontrados na liga produzida e contaminantes encontrados em ligas comerciais utilizadas como base de comparação foram analisados por espectroscopia de massa por plasma acoplado indutivamente (ICP-MS).

3 Resultados e discussão

3.1. Análise das curvas de resfriamento e microestrutura

As curvas de resfriamento retratando a temperatura medida por cada termopar ao longo da solidificação do lingote são mostradas na **Figura 4**.

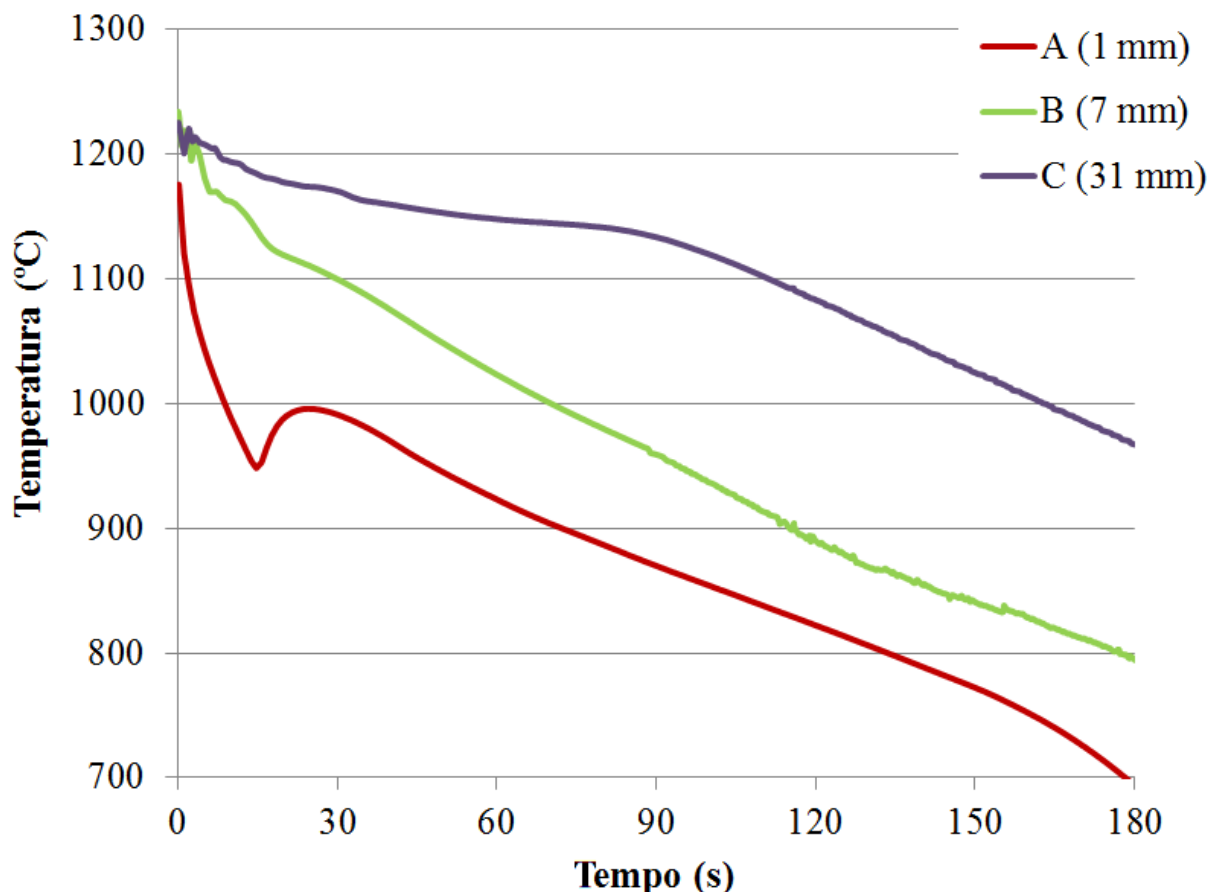


Figura 4 - Curvas de resfriamento para os termopares em alturas de 1 mm, 7 mm e 31 mm.

Fonte: Elaborado pelos autores.

Nota-se que a temperatura inicial, a mais alta medida, ficou entre 1200 °C e 1250 °C, embora a temperatura de vazamento da liga tenha sido por volta de 1370 °C, de acordo com o pirômetro ótico. Isto se deve em parte à perda de calor por radiação do metal líquido durante o vazamento no seu trajeto até entrar em contato com os termopares.

Para os termopares B e C, afixados a 7 mm e 31 mm de altura em relação à coquilha, notamos uma oscilação nas temperaturas medidas nos primeiros segundos da solidificação, que corresponde com as variações obtidas ao se medir a temperatura de metal líquido.

Considerando que essa liga apresenta uma temperatura liquidus (do início da solidificação, no campo Fe + líquido) de aproximadamente 1250 °C para esta composição, de acordo com o diagrama de fases exposto na **Figura 5**, pode-se inferir que os termopares registraram de fato o início da solidificação.

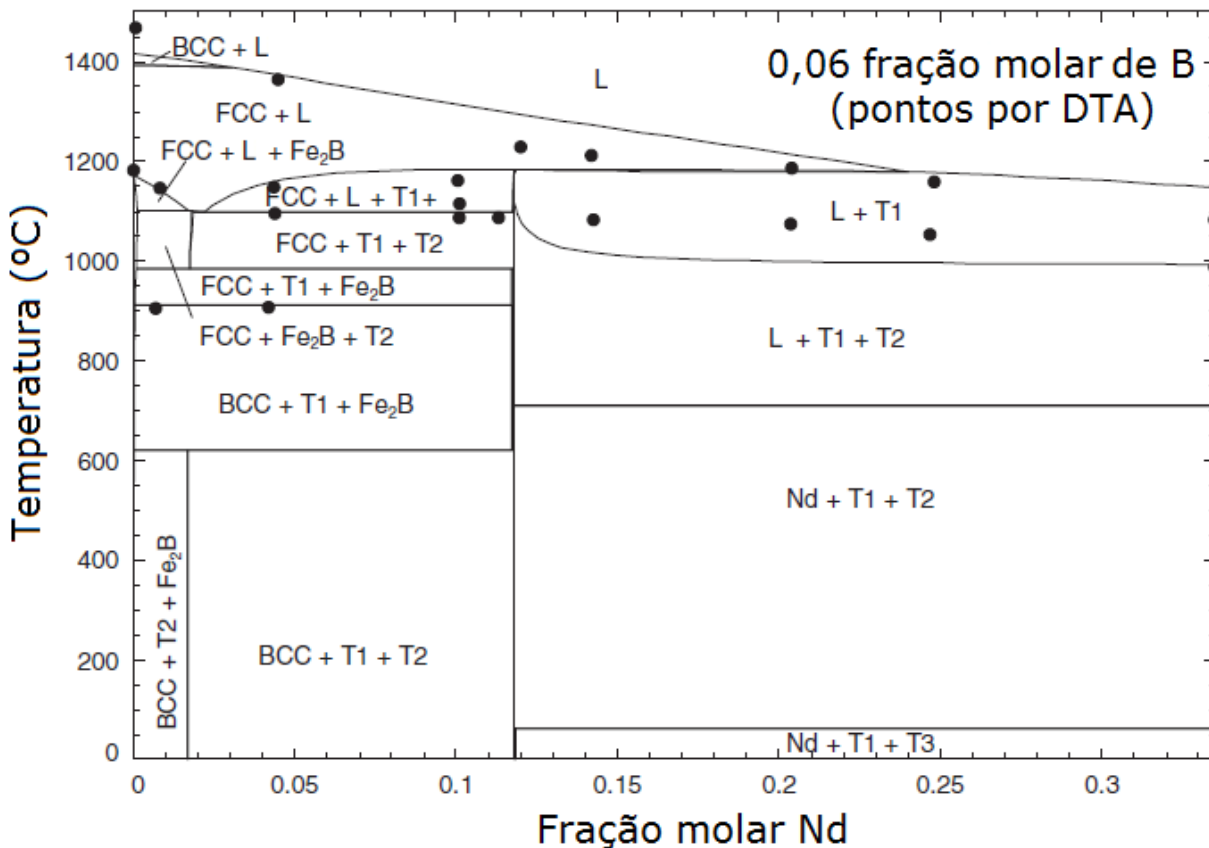


Figura 5 - Diagrama pseudo-binário do sistema Nd-Fe-B para uma fração molar de 0,06 de B, L significa líquido, T1 equivale a Φ ($\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$) e T2 a η ($\text{Nd}_1\text{Fe}_4\text{B}_4$).

Fonte: Adaptado de Che, Liang e Wang (1986)

Para o termopar A, afixado a 1 mm de altura, nota-se uma grande queda de temperatura, inclusive para abaixo da temperatura de início de formação de fase Φ , de aproximadamente 1180 °C, conforme o diagrama de fases. Isso indica que o líquido foi super-resfriado até uma temperatura próxima de 950 °C, quando a sua solidificação se iniciou gerando calor latente que provocou uma recalescência do material até 1000 °C.

Embora as taxas de solidificação finais, observadas de 120 s em diante, sejam relativamente próximas para os três termopares, nota-se na **Figura 3** que as taxas iniciais, observadas até 30 s, são mais elevadas para os termopares mais próximos da coquelha de cobre.

Isto está coerente com o balanço de energia da solidificação, considerando que existe uma troca de calor pouco significativa com o anel de contenção de alumina por se tratar de material refratário e que existe uma troca maior de calor com a coquilha de cobre refrigerada, espera-se que a solidificação prossiga de forma relativamente direcional, com as regiões inferiores do lingote solidificando primeiro que as regiões superiores, com taxas gradualmente mais lentas.

A fração volumétrica de ferro alfa encontrada na microestrutura de acordo com a altura em relação à base do lingote é mostrada na **Figura 6**, com cada ponto representado a média de cinco campos medidos.

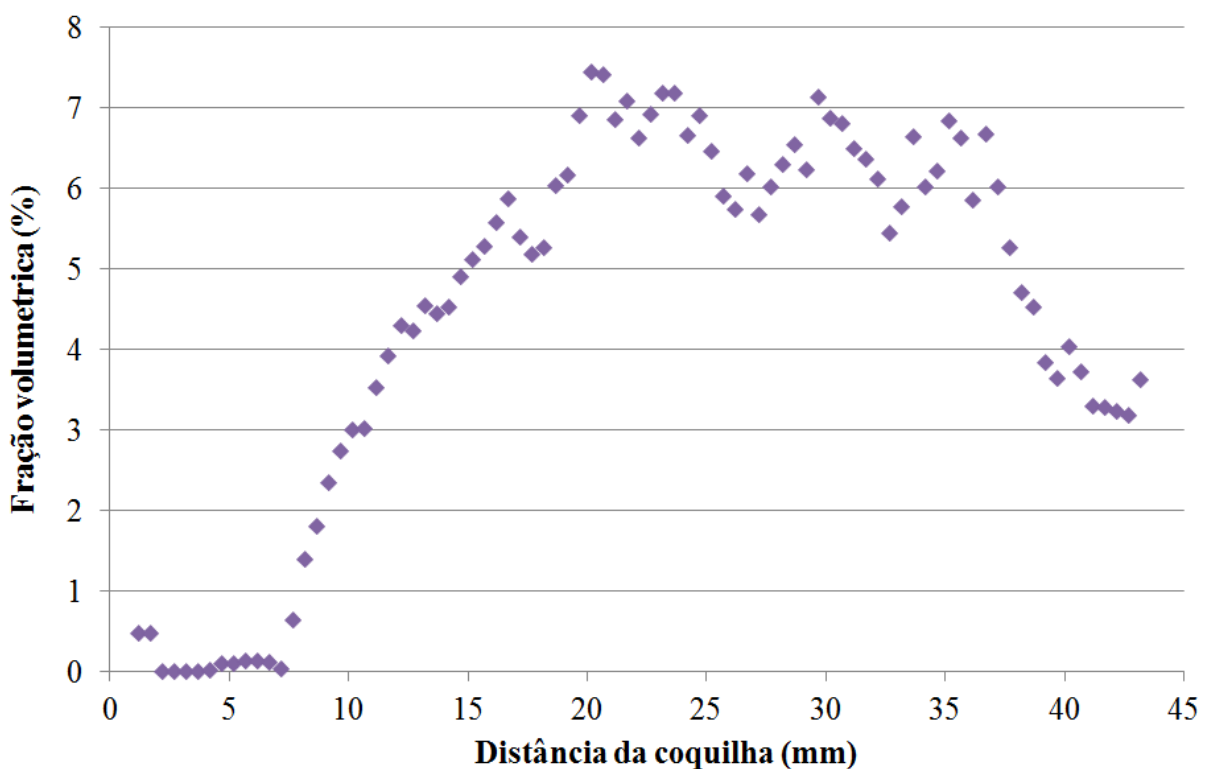


Figura 6 – Fração volumétrica de Fe- α em função da distância da base do lingote.

Fonte: Elaborado pelos autores.

A fração volumétrica de ferro alfa observada a distâncias da coquilha inferiores a 7 mm é nula, exceto por alguns campos que elevam o valor dos dois primeiros pontos (cada qual é uma média de cinco campos) para 0,5 %. Essas pequenas regiões com ferro alfa podem ter se formado ao longo do vazamento, já que a temperatura inicial registrada para o termopar A foi inferior a 1250 °C.

Para alturas maiores do que 7 mm temos uma fração de ferro que cresce com altura até aproximadamente 20 mm, quando ela oscila, apresentando grande dispersão, porém permanecendo ao redor de uma média de 6 %, antes de cair novamente a partir de 37 mm.

Se frações crescentes de ferro alfa forem associadas com taxas de resfriamento progressivamente mais lentas à medida que cresce a altura do lingote, é possível supor que a perda de calor por radiação pelo topo do lingote tenha gerado taxas mais elevadas perto do topo, com uma respectiva queda no teor de ferro observado.

Na **Figura 7**, temos uma imagem de elétrons retroespalhados de uma região próxima do topo do lingote, que nos permite identificar as fases presentes. A fase cinza presente em maior quantidade, marcada pelo número 1, corresponde à fase Φ ($\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$). Ela possui propriedades magnéticas excelentes e é o objetivo da solidificação.

A fase cinza presente em menor quantidade, marcada pelo número 2, corresponde com a fase η ($\text{Nd}_1\text{Fe}_4\text{B}_4$). Devido a sua composição relativamente próxima a fase Φ , e também por estar presente em pequena quantidade, a fase η ($\text{Nd}_1\text{Fe}_4\text{B}_4$) não é facilmente visualizável nas micrografias apresentadas, porém, como todas as outras fases, ela foi identificada por análise EDS.

Na **Figura 7**, a fase mais escura corresponde a dendritas de ferro alfa, identificada pelo número 3. A fase mais clara corresponde ao neodímio metálico, formado em consequência do excesso de Nd na composição desta liga. Nessa fase, identificamos alguns vales mais escuros que são resultado do arrancamento de material oxidado durante a preparação da amostra.

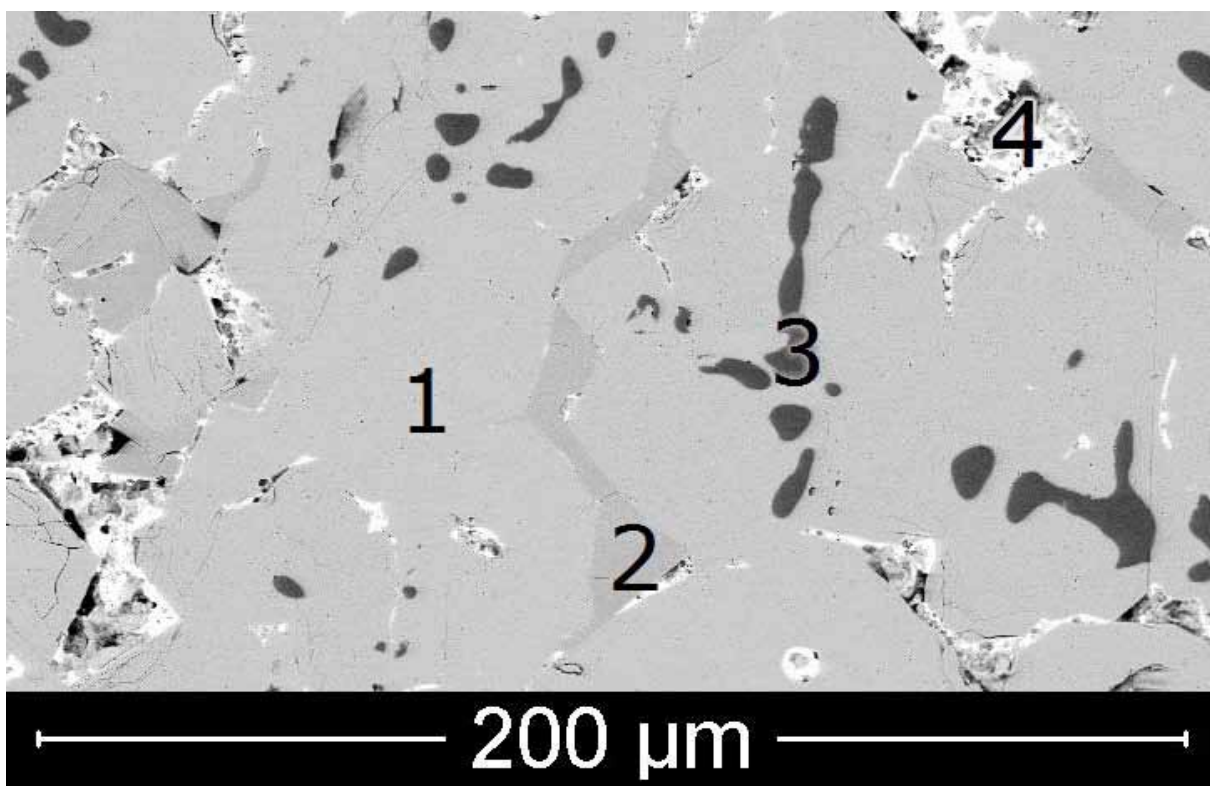


Figura 7 – Imagem de elétrons retroespalhados com identificação das fases.

Fonte: Elaborado pelos autores.

Outras micrografias de elétrons retroespalhados de campos maiores da amostra podem ser vistas na **Figura 8** e na **Figura 10**. Além disso, na **Figura 9** e na **Figura 11** temos imagens de microscopia ótica de luz polarizada com um ângulo de 95° entre o filtro e a luz emitida de campos com as mesmas alturas que os correspondentes de microscopia eletrônica.

Devido às propriedades magnéticas da fase Φ , forma-se uma estrutura de domínios magnéticos alinhados com a orientação cristalográfica do material, o que rotaciona suavemente a polarização da luz incidente, gerando tonalidades diferentes conforme a orientação cristalográfica do material.

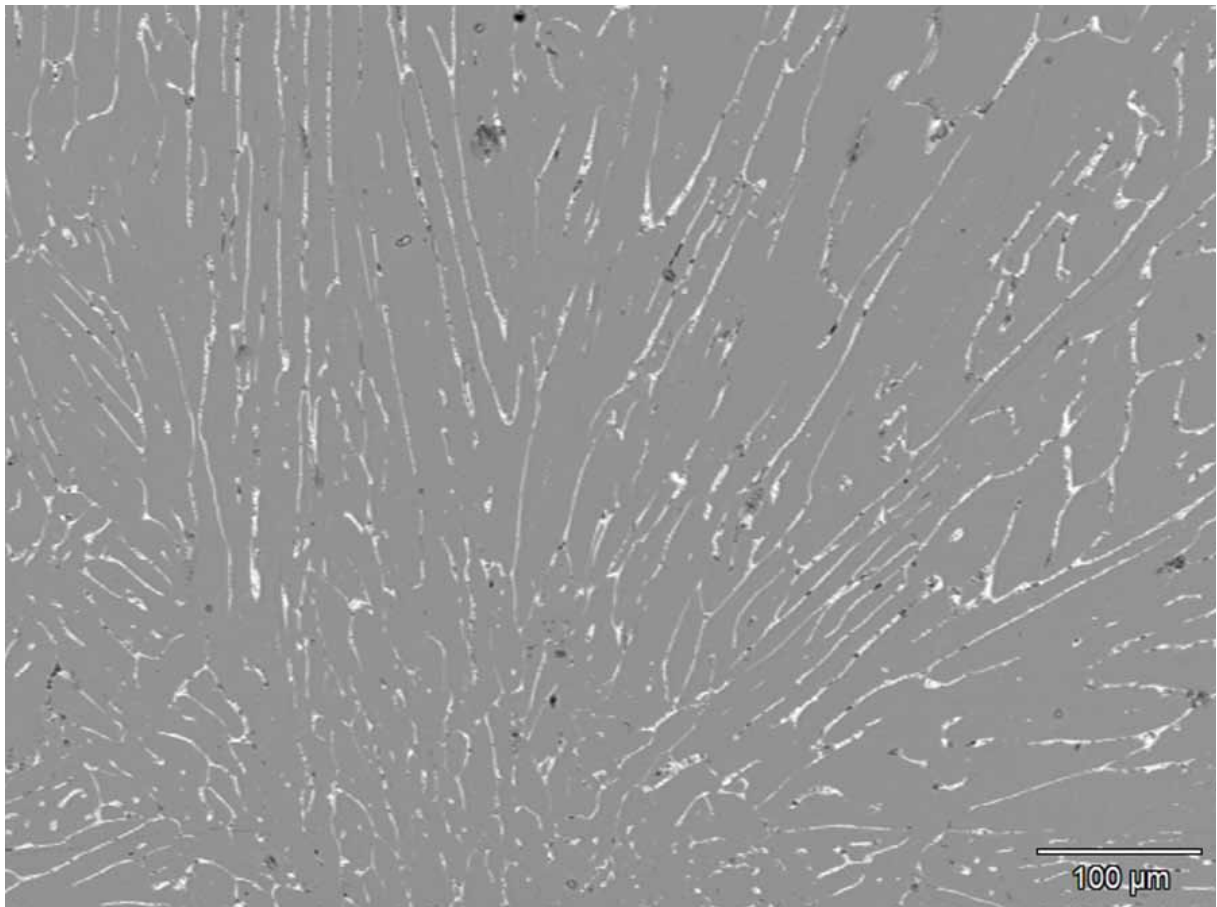


Figura 8 - Imagem de elétrons retroespalhados da base do lingote.

Fonte: Elaborado pelos autores.

Observando a **Figura 8**, notamos uma estrutura dendrítica alongada da fase Φ , em forma de leque, levemente mais alongada na direção vertical, que corresponde à direção de extração de calor, sugerindo crescimento nesta direção. Também vemos a presença de Nd metálico e alguns grãos de η , formados no final da solidificação (devido à sua menor temperatura de fusão) entre os braços de dendrita de Φ .

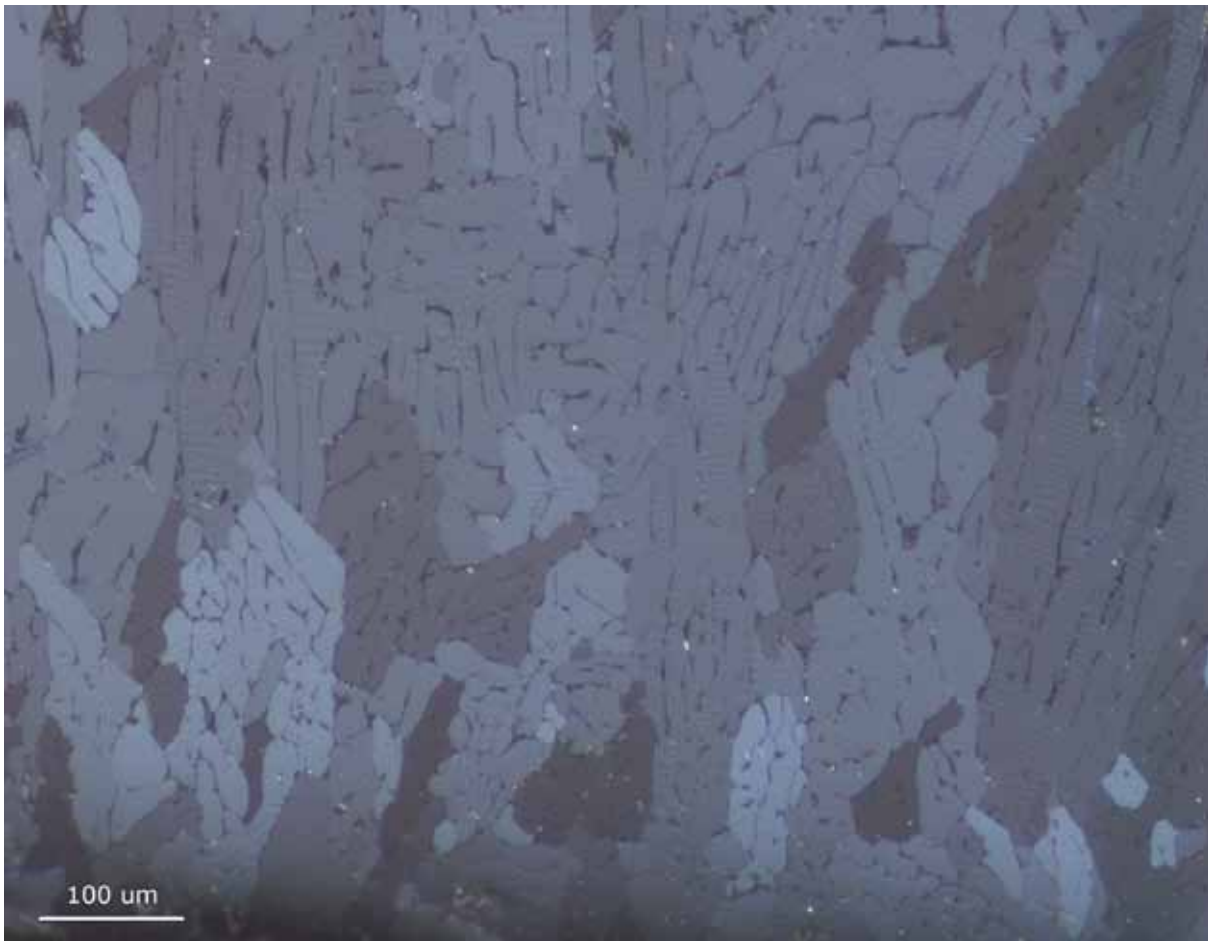


Figura 9 – Imagem de luz polarizada (95°) da base do lingote.

Fonte: Elaborado pelos autores.

Na **Figura 9**, existe uma pluralidade de orientações cristalográficas bem junto à base, que se reduz a um conjunto mais restrito a uma altura levemente maior, sugerindo que existem direções preferenciais de crescimento para esta liga, as quais terminam por dominar as demais. Existem pouquíssimas menções de direção preferencial de crescimento para a fase Φ na literatura. Por outro lado, podemos notar como as estruturas alongadas observadas nas imagens de MEV, correspondem a braços de dendrita agrupados em diferentes grãos.

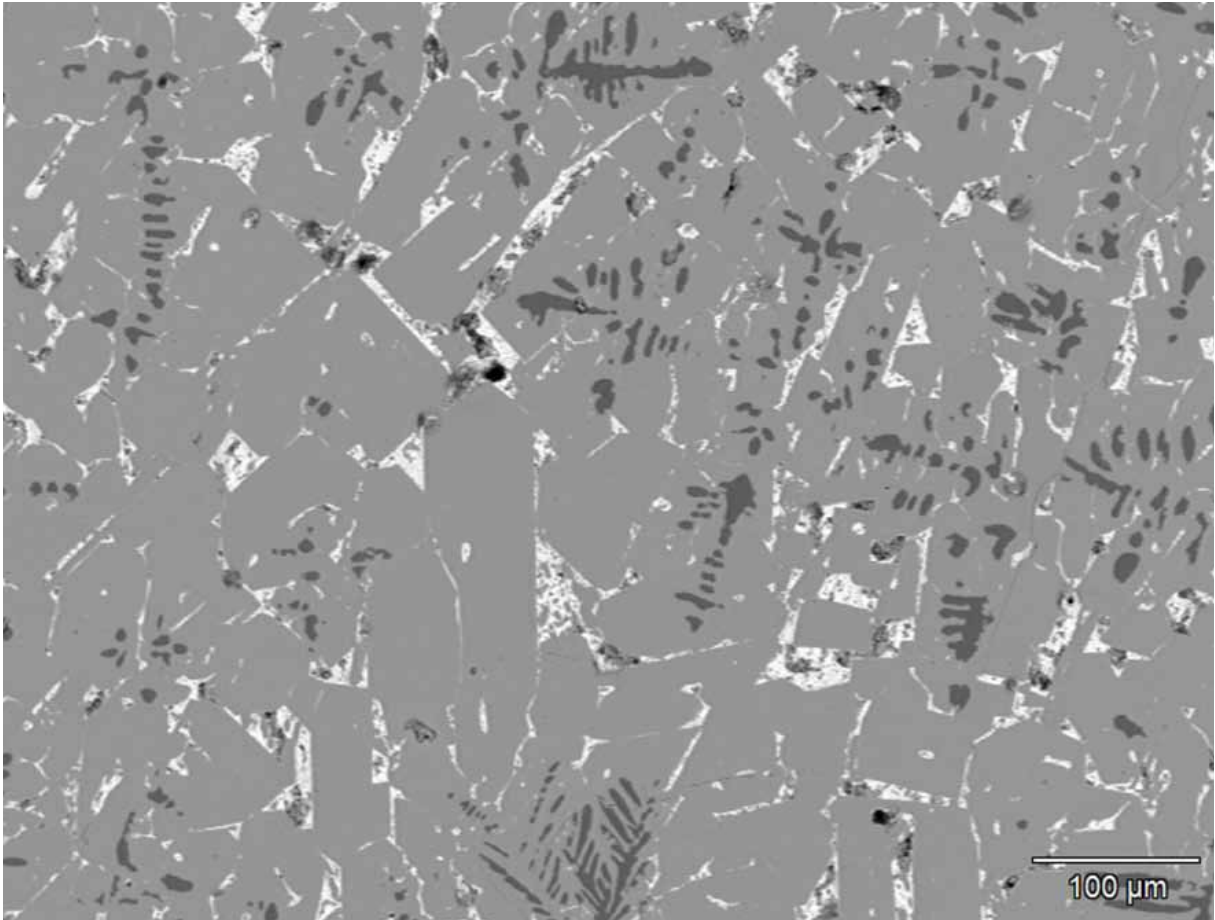


Figura 10 – Imagem de elétrons retroespalhados a 13 mm da base do lingote.

Fonte: Elaborado pelos autores.

Na **Figura 10** e na **Figura 11**, as estruturas correspondentes à fase Φ e ao Nd metálico não são alongadas nem apresentam uma orientação preferencial como na região da base do lingote, sugerindo a transição de crescimento colunar para equiaxial nas regiões mais distantes da coquilha. Notamos a presença de dendritas de ferro alfa, no interior da fase Φ , a qual provavelmente nucleou e cresceu inicialmente através da reação peritética. Essa reação resultou na transformação de parte do Fe, mas não se completou, visto que ainda resta Fe alfa na estrutura. Por fim, é possível observar alguns contornos que formam segmentos de reta no plano da figura entre a fase Φ e o Nd, dando indícios de um crescimento facetado da fase Φ para esta região do lingote.

Zhong et al. (2008) estudaram a solidificação de uma liga com composição $\text{Nd}_{14}\text{Fe}_{79}\text{B}_7$ sob diferentes velocidades de resfriamento utilizando forno de solidificação direcional do tipo Bridgman. Nesse tipo de forno, um cadinho alongado na altura contendo o banho líquido é extraído da zona quente do forno em direção à zona fria de forma que a interface sólido-líquido se mantenha na mesma posição, resultando que a velocidade de solidificação seja controlada pela velocidade de extração.

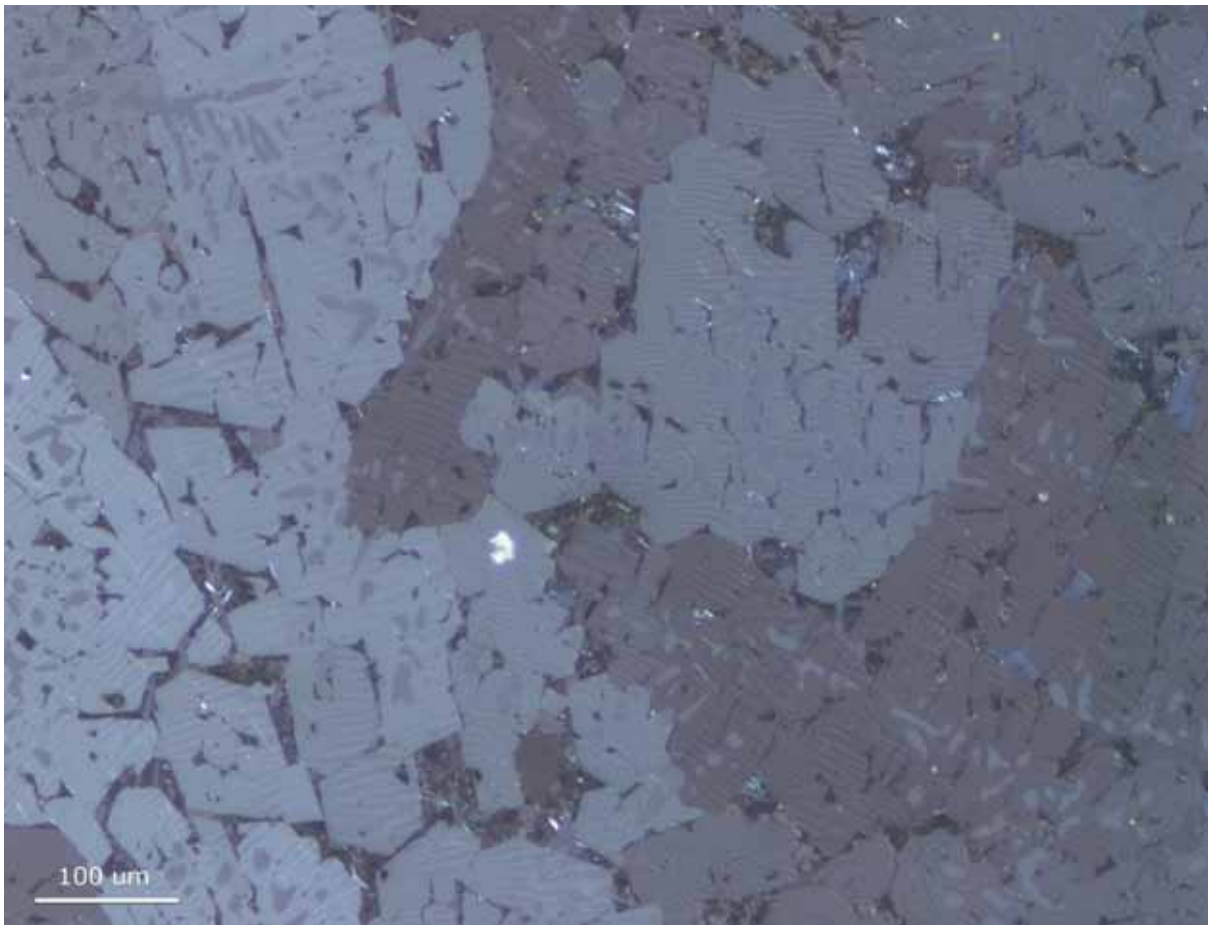


Figura 11 – Imagem de luz polarizada (95°) a 13 mm da base do lingote.
Fonte: Elaborado pelos autores.

Entre seus resultados, com uma velocidade de extração de 200 $\mu\text{m/s}$, Zhong et al. (2008) obtiveram uma microestrutura semelhante à mostrada na **Figura 10** e na **Figura 11** com dendritas primárias de ferro alfa, Φ peritético e Nd formado no fim da solidificação, sem direcionalidade. Além disso, para uma velocidade de 3 mm/s eles obtiveram uma estrutura semelhante à **Figura 8** e à **Figura 9**, com dendritas primárias de Φ na forma de leques alongados na direção de extração de calor, de acordo com o que foi constatado no presente trabalho.

Segundo Volkmann et al. (2004), isso se dá pois é necessário certo grau de super-resfriamento para evitar a formação de ferro alfa e gerar a precipitação de dendritas primárias de Φ . Ao realizar experimentos com uma gota levitada eletromagneticamente cujo super-resfriamento foi mantido a 5 K, para uma liga de composição $\text{Nd}_{14}\text{Fe}_{79}\text{B}_7$, os autores encontraram presença marcante de Fe alfa na microestrutura do material, devido à transformação peritética incompleta.

Para a mesma liga, com 60 K de super-resfriamento, Volkman et al. (2004) não observaram formação de Fe- α . Para uma liga de composição estequiométrica Nd₂Fe₁₄B, o autor afirmou que não houve supressão da formação de Fe alfa mesmo em super-resfriamentos da ordem de 80 K.

Neste trabalho, retomando a **Figura 4**, notamos que a região a 1 mm da coquilha sofreu um super-resfriamento de mais de 200 K, enquanto que a região a 7 mm não sofreu super-resfriamento. O grande super-resfriamento sofrido pelo líquido nas regiões mais próximas da coquilha resultou na nucleação e crescimento de dendritas primárias da fase Φ que se estenderam de acordo com a direção de extração de calor até uma altura próxima de 7 mm, antes que pudesse ocorrer um crescimento significativo do ferro. Para alturas superiores a 7 mm, o ferro solidificou antes e depois foi parcialmente transformado pela reação peritética. Quanto maior a altura, mais a reação peritética tardou a ocorrer, possibilitando que uma fração maior de ferro se formasse.

3.2. Análise química

Segundo a análise química realizada por ICP-OES, apresentada na **Tabela 2**, constatamos que não ocorreu perda significativa de Nd por evaporação nem pela reação com o cadinho e o funil durante a fusão e vazamento da liga. O resultado é indicativo de que uma pequena parcela do boro não foi incorporada à liga, possivelmente porque os pedaços de ferro-boro não se dissolveram completamente no banho. Por outro lado, pode haver alguma forma de interferência não contabilizada na metodologia de análise ICP-OES para este elemento.

Tabela 2– Análise ICP-OES dos componentes majoritários da liga produzida.

Elemento	Nd (mol/mol)	Fe (mol/mol)	B (mol/mol)
Fração molar nominal	0,15	0,775	0,075
Fração molar ICP-OES	0,15 +/- 0,01	Bal.	0,06 +/- 0,01

Fonte: Elaborado pelos autores.

A partir da análise de impurezas na matéria prima utilizada, cujos resultados são apresentados na **Tabela 3**, vemos que os principais elementos presentes nos pedaços de Fe utilizados são Na e Si, em teores por volta de 300 mg/kg cada um. Em particular, notamos que o sódio não foi detectado em teores elevados na liga produzida, possivelmente porque houve uma perda de sódio por evaporação ou oxidação.

Para o ferro-boro, o principal elemento minoritário presente é o Al, num teor acima de 4000 mg/kg. Porém, o alumínio é utilizado como elemento de liga na composição dos ímãs de Nd-Fe-B, podendo chegar a teores de 1500 mg/kg em ligas comerciais, de forma que a sua presença não é indesejada. Embora também haja uma presença de sódio e silício no ferro-boro, a quantidade utilizada na produção da liga foi pequena o bastante para que o sódio se diluísse resultando em um teor relativamente baixo na liga final.

Considerando a composição da liga produzida, notamos uma contaminação significativa de silício, num teor mais elevado do que as matérias primas, sugerindo que ele foi oriundo do processo. O cadinho de alumina contém um teor de sílica, a qual deve ter sido reduzida pelo neodímio, resultando na alta contaminação de silício.

O neodímio utilizado possui uma pureza acima de 99,9 % segundo o fabricante, e os principais contaminantes que ele adiciona ao banho são os outros elementos de terras raras encontrados na liga, mas que também se encontram em ligas comerciais, devido à grande dificuldade de separá-los do Nd. No entanto, pode haver alguma contaminação de Si e Al oriunda do próprio Nd metálico.

Tabela 3 – Análise de contaminantes por ICP-MS.

Elemento	Lingote obtido (mg/kg)	Fe-B (mg/kg)	Fe (mg/kg)	Ligas comerciais* (mg/kg)
Na	101	778	315	0
Mg	3	37	6	0
Al	532	4032	39	6-1560
Si	3649	1582	313	136-496
Ca	101	158	56	0
Cr	101	373	40	80-151
Ni	37	98	48	0-108
Nb	3	14	2	0,6-360
Ce	16	2	1	18-33
Tb	23	0	0	27-91
Er	32	0	0	28-53
Ho	1	0	0	3,2-5000
W	9	13	2	23-275

Fonte: Elaborado pelos autores.

*faixas de teores entre as 12 ligas analisadas;

4 Conclusões

Ao realizar a solidificação sobre coquilha de cobre refrigerada de um lingote de composição nominal $\text{Nd}_{15}\text{Fe}_{77,5}\text{B}_{7,5}$, após fusão em forno de indução a vácuo, foram obtidas duas regiões com microestruturas distintas.

Na região próxima à coquilha, devido à alta taxa de extração de calor, o líquido fortemente super-resfriado solidificou em dendritas primárias de fase Φ ($\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$) com braços alongados na direção de extração de calor, com neodímio metálico e fase η formando-se entre os braços de Φ no final da solidificação. A fração volumétrica de ferro alfa identificada nesta região da amostra esteve muito próxima de zero, exceto por alguns campos, nos quais ela atingiu 0,5 %.

Na região distante da coquilha, ocorreu solidificação de ferro alfa seguida de crescimento de fase Φ peritética sem direção preferencial com alguns contornos facetados e, por fim, Nd e η no final da solidificação.

A análise química por ICP-OES mostrou que a perda de Nd por evaporação e oxidação foi desprezível. Segundo a análise química por ICP-MS, os contaminantes encontrados condizem com os encontrados nas ligas comerciais, excetuando-se pelo Al e pelo Si, que podem ter surgido através da reação do banho líquido de metal com o cadinho de alumina-sílica.

5 Referências

ANDRADE, R. H. P. Terras raras. In: **Sumário Mineral 2015 – DNPM**. Brasília: Departamento Nacional de Produção Mineral, 2016. p. 108-109. Disponível em: <<http://www.dnpm.gov.br/dnpm/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/sumario-mineral/sumario-mineral-brasileiro-2015>>. Acesso em: 22 nov. 2017.

BERNARDI, J.; FIDLER, J.; SAGAWA, M., HIROSE, Y. Microstructural analysis of strip cast Nd-Fe-B alloys for high (BH)_{max} magnets. **Journal of Applied Physics**, v. 83, n. 11, p. 6396-6398, 1998.

CHE, G., LIANG, X., WANG, X. Phase Diagram of Nd-Fe-B Ternary System. **Scientia Sinica A**, V. 29, p.1172-1185, 1986.

FERREIRA NETO, J. B.; LANDGRAF, F. J. G.; ETT, G.; SANTOS, C. A. L.; SILVA, A. L. N.; SILVEIRA, J. R. F.; VIEIRA, F. Y. M.; LUZ, M. S. Didymium obtainment from rare earth oxides produced in Araxá, Brazil. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON RARE-EARTH AND FUTURE, 24., 2016, Darmstadt, Alemanha. **Proceedings...** Darmstadt: REPM/ Technical University of Darmstadt, 2016.

VOLKMANN, T.; GAO, J.; STROHMENGER, J.; HERLACH, D. M. Direct crystallization of the peritectic Nd₂Fe₁₄B phase by the undercooling of the melt. **Materials Science and Engineering A**, v. 375-377, p. 1153-1156, July 2004.

ZHONG, H.; LI, S.; LÜ, H.; LIU, L., ZOU G.; FU, H. Microstructure evolution of peritectic Nd₁₄Fe₇₉B₇ alloy during directional solidification. **Journal of Crystal Growth**, v. 310, n. 14, p. 3366-3371, 2008

Evaluation of non-intrusive systems for internal corrosion monitoring

Avaliação de sistemas não destrutivos para monitoramento de corrosão interna

Victor G. Silva^a, Gustavo L. Vaz^a, Pedro A. Ferreira^a, Anna Ramus Moreira^b, Neusvaldo L. de Almeida^{b*}

Este artigo, apresentado na "Rio Pipeline Conference & Exhibition 2017", realizada na cidade de Rio de Janeiro, recebeu o "CALGARY AWARD" de melhor artigo do evento.

Abstract

Internal corrosion is one of the major problems affecting the integrity of pipelines and process equipment. For this reason, the internal corrosion monitoring becomes essential to anticipate eventual problems and to select the most appropriate strategy to mitigate the corrosive process. Due to the problems related to the cost, logistics and safety inherent to coupon and electric resistance probe retrieving, it is very important to seek alternatives to the current methods, to optimize the monitoring tasks. The use of non-intrusive equipment to monitor internal corrosion is an alternative that aims at optimizing this step. Additionally, the non-intrusive equipment has easy installation and maintenance, higher data reliability and faster results. These systems consist of estimating the trend of the corrosion rate through devices installed on the external side of pipelines without the need of access fittings, unlike conventional techniques. The great advantage of using this technique is the absence of interventions for components retrieving, minimizing operational risks. To evaluate such equipment, tests were carried out under dynamic conditions, varying the fluid characteristics to verify the speed of response of some commercial devices, always comparing them to conventional methods (coupon and electric resistance probe). Experimental results showed that the trend of measured corrosion rate obtained by the non-intrusive equipment converged with corrosion coupons and electric resistance probe data.

Victor G. Silva, Gustavo L. Vaza,
Pedro A. Ferreira, Anna Ramus
Moreira, Neusvaldo L. de Almeida*

^a CENPES, Petrobras, Rio de Janeiro-
RJ, Brasil.

^b Laboratório de Corrosão e
Proteção, Instituto de Pesquisas
Tecnológicas do Estado de São
Paulo S.A., São Paulo-SP, Brasil.

*e-mail: neusval@ipt.br.

Palavras-chave:

corrosão; técnica não destrutiva,
monitorização da corrosão

Keywords:

corrosion; non-destructive
technique, corrosion monitoring.

Resumo

A corrosão interna é um dos principais problemas que afetam a integridade de dutos e dos equipamentos de processo. Por este motivo, o monitoramento da corrosão interna torna-se essencial para antecipar eventuais problemas e selecionar a estratégia mais apropriada para mitigar o processo corrosivo. Devido aos problemas relacionados a custo, a logística e a segurança inerentes à recuperação de sondas de resistência elétrica e de cupom de perda de massa, é muito importante buscar alternativas aos métodos atuais, a fim de otimizar as atividades de monitoramento. O uso de equipamentos não intrusivos para monitorar a corrosão interna é uma das alternativas promissoras. Além disso, os equipamentos não intrusivos são de fácil instalação e manutenção, apresentam maior confiabilidade de dados e são capazes de fornecer resultados mais rápidos. Essas técnicas permitem estimar com boa aproximação a tendência da taxa de corrosão por meio de dispositivos instalados na superfície externa dos dutos sem a necessidade de tomadas de acesso, ao contrário das técnicas convencionais. Uma das grandes vantagens desta técnica é não necessitar intervenções para recuperação de componentes, minimizando os riscos operacionais. Para avaliar esses equipamentos, ensaios foram realizados em condições dinâmicas, variando as características do fluido para verificar a velocidade de resposta de alguns dispositivos comerciais, sempre os comparando com métodos convencionais (cupom de perda de massa e sonda de resistência elétrica). Os resultados experimentais mostraram que a tendência da taxa de corrosão obtida pelos equipamentos não intrusivos mostrou boa correlação com as taxas obtidas com cupons de perda de massa e com sonda de resistência elétrica.

1 Introduction

Internal corrosion is one of the main problems related to pipeline integrity. The occurrence of internal corrosion is a function of the type of material and the composition of the fluids. Generally, the material used in pipelines is carbon steel which, although having a low cost and good weldability, is quite susceptible to corrosion in the presence of water and oxygen. In addition, the presence of contaminants, such as CO_2 , H_2S , salts and microorganisms in the transported fluids, increase their corrosivity (ROBERGE, 2007).

For these reasons, some methods for corrosion control are employed, such as the use of protective coatings, chemicals injection, such as corrosion inhibitors, PIG launching, among others. For the application of the most appropriate control method, it is necessary to monitor internal corrosion of pipelines to determine the potential corrosivity of the fluids and to better understand the corrosive process in place (ROBERGE, 2007).

One of the most important steps in pipeline corrosion monitoring consists on determining corrosion rates to evaluate the corrosivity potential of the fluid. Currently, this step is accomplished using corrosion coupons and electrical resistance probes (ER), inserted in the pipeline (ROBERGE, 2007).

These techniques require periodic interventions, either for the exchange of the corrosion coupons and its subsequent evaluation or for the replacement of the sensor element of the electrical resistance probe. The frequency of coupon and a sensor element exchange varies according to the corrosivity of the fluid (NACE INTERNATIONAL, 2013; PETROBRAS, 2016).

The non-intrusive equipment (NIE) estimates the trend of the corrosion rate through devices installed on the external side of a pipeline. The great advantage of using these techniques is the absence of interventions for component exchange and/or maintenance, decreasing retrieval operation risks and optimizing the corrosion monitoring logistics. However, NIE usually has low sensitivity in comparison with intrusive methods (NACE INTERNATIONAL, 2012).

To evaluate such type of equipment, tests were carried out under dynamic conditions, varying the fluid characteristics to verify the speed of response of some commercial devices. The results were compared with corrosion rate measured with ordinary intrusive methods (coupon and ER probe).

2 Methodology

The corrosion tests were performed in a closed loop and the corrosion environment was aerated water with and without some contaminants, resulting in conditions with different corrosivity. The loop consists of 50.8 mm (2 inch) tubes made of carbon steel, internally coated with FBE (Figure 1).

The devices were installed in a test section at a 101.6 mm (4 inches) carbon steel spool positioned at the upper region of the loop (red arrow in Figure 1). The fluid flows in the system through a pump that can operate at a flow rate up to 100 L/min. No heating system was used because the tests were performed at room temperature.



*Figure 1 - Corrosion loop used to evaluate non-intrusive techniques.
Source: Authors.*

Six non-intrusive devices were tested in addition to corrosion coupons and two electrical resistance probes. Five NIE considered in the tests were based on ultrasonic method and only one was based on electrical field method.

*In addition to the NIE, four corrosion coupons were used in two access fittings (multiple rod containing two coupons each) and two different probes: one of high sensitivity (HS) and one conventional ER probe. The coupons and the ER probes were installed at the initial section of the spool (blue arrow in **Figure 1**).*

***Figure 2** shows in detail two coupon access fittings, the conventional ER probe and the high sensitivity probe (left to right). The conventional ER probe has sensor thickness of 127 μm (5 mils) which is the type currently used in the field.*



*Figure 2 - Intrusive instruments used in the tests.
Source: Authors.*

The main objective of these tests was to evaluate the sensitivity of each equipment when compared to corrosion coupons and ER probes. Three different conditions were simulated using aerated water with and without contaminants. **Table 1** presents the test conditions.

*Table 1 - Test conditions.
Source: Authors.*

<i>Condition</i>	<i>Corrosion environment</i>	<i>Flow rate (L/min)</i>	<i>Duration (d)</i>	<i>Temperature</i>	<i>pH (initial)</i>	<i>pH (final)</i>
A	Aerated deionized water	100	30	Room temperature	7	9
B	Aerated deionized water containing 3.5% NaCl and 100 mg/L acetic acid	100	27	Room temperature	3.5	5
C	Aerated deionized water	100	30	Room temperature	7	5

Each condition was performed for 30 days. The first (A) and the third (C) conditions were performed using the same fluid which was aerated deionized water with no contaminants, i.e., a low corrosivity fluid. The tests were started with the aerated deionized water and were conducted for 30 days without changing the solution. After this period, the loop was drained and the deionized water was replaced with water with some contaminants (3.5 % NaCl and 100 mg/L acetic acid - see **Table 1**). After almost 30 days, the loop was drained again and the solution was replaced again with aerated deionized water.

This test lasted three months in total, with the corrosivity of the fluid varying every 30 days. The results of the three trials and their respective discussions is presented below.

3 Results and discussion

3.1. Test solution characteristics

Two aqueous solutions of different chemical composition (pure deionized water and deionized water containing 3.5 % NaCl + 100 mg/L of acetic acid) were considered. In the first 30 days, aerated deionized water (condition A) was used. Condition B was carried out with aerated water containing sodium chloride and acetic acid. It remained in the loop for the following 27 days and finally the fluid was again exchanged for pure deionized water which remained for the following 30 days (condition C). Complete test lasted 87 days, according to **Table 1**.

Table 2 shows the pH values of tested fluids before and after each test conditions. For conditions A and B, the measured pH values were similar to those of simulated pH values. However, for condition C, the final water presented an unexpected acidification (pH dropped from 6.7 to 5.3). At the beginning, the pH was almost neutral (6.7) because the loop was filled with deionized water. Most probably, after the fluid started to move inside the loop, the circulating water was contaminated by a small quantity of the previous fluid that possibly remained in the loop. However, the thermodynamic simulation does not indicate a significant decrease in pH with a contamination of the solution of condition C with up to 10 % of the solution used in condition B (simulated pH 6.9). Another hypothesis would be that with the change of inventory of an acidic solution to a neutral/alkaline one, dissolved iron ions could undergo hydrolysis which would result in a decrease in pH.

Table 2 – Fluid pH and iron content monitoring x simulated.

Source: Authors.

Condition	Initial pH simulated	Initial pH measured	Final pH simulated	Final pH measured	Dissolved Iron simulated (mg/kg)	Dissolved Iron max measured (mg/kg)
A	7	6.8	9.4	8.9	0.75	NA
B	3.7	3.7	6.1	5.3	45	NA
C	7	6.7	9.4	5.3	0.75	13.3

Figure 3 shows the Pourbaix diagram obtained by OLI STUDIO ANALYSER 9.1 simulation software for the studied medium. The red rectangle indicates the corrosion potential region of carbon steel ($E = +0.44 \text{ V (SHE}^\circ)$ at 25°C). In the acid water (condition B), a wide region of corrosive process domain is favored by the presence of O_2 in the medium. In neutral and alkaline medium, the rectangle represents the region prone to precipitation of iron oxide. Thus, a higher generation of corrosion products is expected for the neutral water test (condition C). This diagram also favors the iron ion hydrolysis argument, because with the abrupt change in pH during inventory exchange, the equilibrium was displaced from the corrosion domain to the iron oxide precipitation domain.

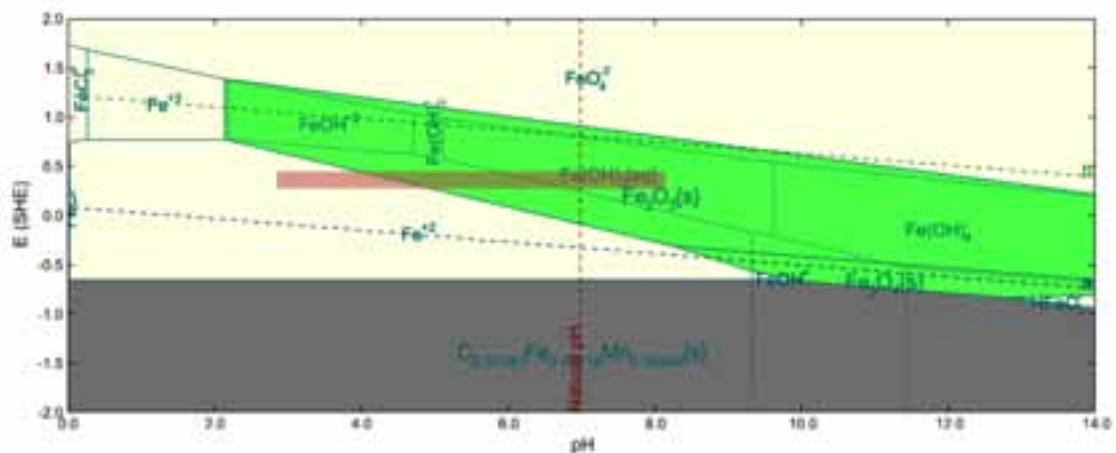


Figure 3 – Pourbaix diagram for iron in aqueous solution at 25°C (OLI ANALYSER STUDIO 9.1).

Source: Authors.

a SHE – standard hydrogen electrode

Figure 4 shows a photograph of the initial part of the inner section of the test tube after condition C. The corrosion products (ferric hydroxide) are distributed throughout all clock position, indicating high iron-ion precipitation rate. However, in the six o'clock position downstream the curve (red arrow in *Figure 4*), where coupons and ER probes are installed, it is possible to observe that there was considerable removal of the corrosion product.



Figure 4 - Internal view of the test section showing the corrosion product removal.
Source: Authors.

3.2. Corrosion Rate Analysis

The results obtained in the test using non-intrusive equipment and the ER probes are shown in *Figure 5* as metal loss as a function of time. The red arrows indicate the periods when the inventory changes were carried out (Condition A, B and C). The ultrasonic methods are identified as "US" and the electrical field method as "EF". The high sensitivity ER probe did not work in condition A because there was an unexpected communication problem that impaired its results. Therefore, the result of this probe was not shown in *Figure 5*.

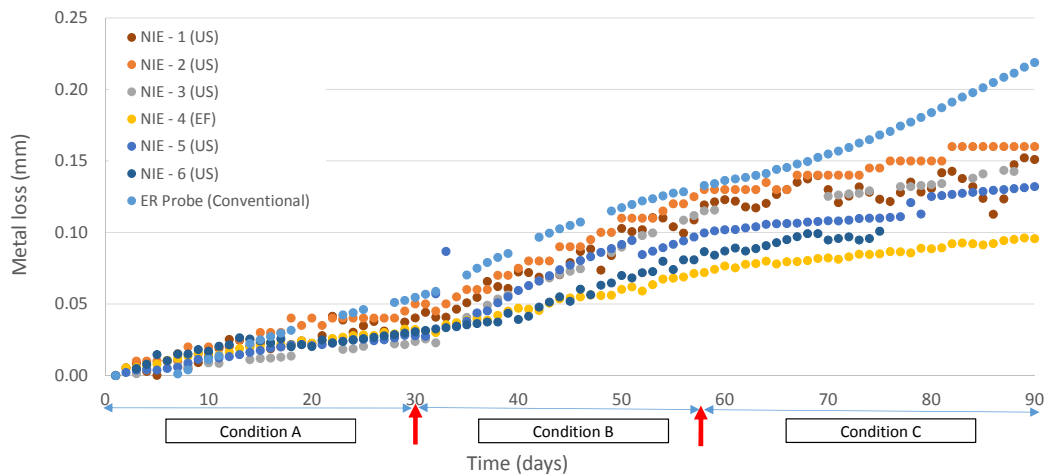


Figure 5 – Metal loss as a function of time results obtained from NIE and ER probe.

Source: Authors.

*In condition A (deionized water - neutral pH), all the equipment showed low metal loss (maximum of 0.05 mm in 30 d) being consistent with the simulated condition. It is possible to observe the change in curves slope between condition A and B, indicating that there was an increase in the corrosivity of the fluid detected by both intrusive and non-intrusive equipment. These results were expected, due to exchange of the neutral pH solution (Condition A) for an acid one (Condition B). **Table 3** confirms that the average corrosion rate in condition B increased.*

*However, as previously reported, in condition C (deionized water, pH almost 7), there was a decrease in the pH during test which may be related to iron-ion hydrolysis due to water inventory change. Through thermodynamic analysis of the fluid in condition C, the possibility of precipitation of corrosion products that could present a protective effect was observed, converging with the results presented by the non-intrusive equipment (**Figure 5**). In the condition C, there was a divergence between the intrusive and non-intrusive equipment, as the former showed an increase in corrosion rate and NIE showed a decreasing, in comparison with condition B.*

Table 3 – Average corrosion rate for each test condition, considering the intrusive and non-intrusive equipment tested.

Source: Authors.

<i>Average Corrosion Rate (mm/y)</i>		
<i>Condition A (30 d)</i>	<i>Condition B (27 d)</i>	<i>Condition C (30 d)</i>
<i>Corrosion Coupon</i>		
0.5	0.9	1.1
<i>Conventional ER Probe</i>		
0.7	1.0	1.0
<i>NIE – 1</i>		
0.5	1.1	0.2
<i>NIE – 2</i>		
0.6	1.1	0.4
<i>NIE – 3</i>		
0.3	1.2	0.4
<i>NIE – 4</i>		
0.4	0.6	0.3
<i>NIE – 5</i>		
0.3	0.6	0.3
<i>NIE – 6</i>		
0.4	0.7	0.3

3.3. Flow Analysis

*In addition to the protective effect caused by corrosion products precipitation in condition C, the flow variation in the loop should be considered. This is because the test section has a diameter of 101.6 mm (4 inches), but the lower part of the loop has a smaller diameter (50.8 mm (2 inches)). Considering the pump flow rate of 100 L/min and the diameter of 101.6 mm (4 inches), the average flow velocity is of the order of 0.2 m/s. As presented in **Figure 6**, in the initial part of the 101.6 mm (4 inches) section pipe, where the intrusive instruments (coupons and ER probes) were installed, it was observed some turbulence (by CFD simulation) due to the diameter variation and the 90° curve. This turbulence*

probably removed the corrosion products which were adhered in the six o'clock position causing a difference in the corrosion rate measured by intrusive and non-intrusive instruments, mainly in condition C. This analysis is quite consistent with the picture showed in **Figure 4**, where it can be seen that there was actually removal of the corrosion product in the region where corrosion coupons and ER probes were installed.

This may explain why, in condition C, the corrosion rate observed by the intrusive equipment, which were installed in the region of higher turbulence, remained high, while the non-intrusive devices installed at the laminar flow region showed lower corrosion rate in comparison with condition B (**Table 3**). Thus, because there was precipitation of iron oxide/hydroxide in condition C due to the ferric ion low solubility at neutral pH, the turbulence contributed to reduce the protective characteristics formed in carbon steel at the region where intrusive instruments were installed.

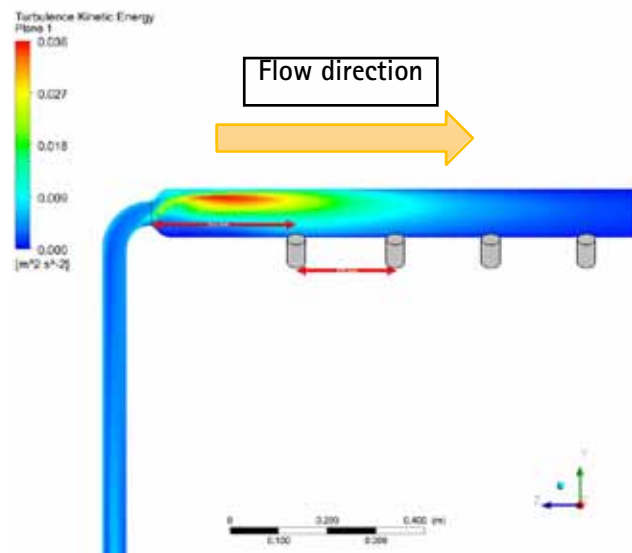


Figure 6 - CFD simulation showing the kinetics energy after diameter change.

Source: Authors.

4. Conclusions

Based on the analysis of the results obtained by closed loop tests, it is possible to conclude that:

- Corrosion coupons and conventional ER probe showed very consistent results, both in the trend of corrosion rate and in absolute values;
- All the evaluated non-intrusive equipment showed the same trend in corrosion rate when compared to intrusive equipment (coupon and ER probe). In condition C, there were some differences when comparing results obtained from non-intrusive and intrusive techniques which were related to the position of the equipment in the test circuit;
- Non-intrusive equipment showed lower sensitivity than coupons and ER probes and therefore, for applications that require immediate actions for corrosion mitigation, such as corrosion inhibitor injection control, this equipment should be evaluated before using or should be used with other corrosion monitoring techniques;
- The internal corrosion management uses several resources to warrantee pipeline integrity. This paper showed that non-intrusive equipment could be one more technique to be chosen for this proposal.

5. References

NACE INTERNATIONAL. 3T199: Techniques for monitoring corrosion and related parameters in field application. Houston, 2012.

NACE INTERNATIONAL. SP0775: Preparation, installation, analysis, and interpretation of corrosion coupons in oilfield operations. Houston, 2013.

PETROBRAS. N-2785 rev. C: Monitoração, interpretação e controle da corrosão interna de dutos. Rio de Janeiro, 2016.

ROBERGE, P. R. Corrosion inspection and monitoring. Ontário: MacGraw-Hill. 2007. 368 p.

IPT
Instituto de Pesquisas Tecnológicas
do Estado de São Paulo

Av. Prof Almeida Prado, 532
Cidade Universitária - Butantã - São Paulo - SP
CEP 05508-901

Central de Relacionamento com o Cliente

(11) 3767-4102 / 4456 / 4091

ipt@ipt.br

www.ipt.br

Redes sociais

twitter.com/@iptsp

youtube.com/IPTbr

facebook.com/iptsp