

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

APRIMORAMENTO DE ESCOAMENTO DE AR EM UM EQUIPAMENTO  
ESTABILIZADOR DE SOLA DE CALÇADOS

por

Leonardo Carpter Medeiros

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, Maio de 2022

## DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO

Medeiros, Leonardo Carpter  
APRIMORAMENTO DE ESCOAMENTO DE AR EM UM EQUIPAMENTO  
ESTABILIZADOR DE SOLA DE CALÇADOS / Leonardo Carpter  
Medeiros. -- 2022.  
15 f.  
Orientador: Diogo V. Andrade.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de  
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto  
Alegre, BR-RS, 2022.

1. Mecânica dos fluidos. 2. Calçados. 3. Simulação  
computacional. 4. CFD. 5. Aperfeiçoamento. I. Andrade,  
Diogo V., orient. II. Título.

Leonardo Carpter Medeiros

APRIMORAMENTO DE ESCOAMENTO DE AR EM UM EQUIPAMENTO  
ESTABILIZADOR DE SOLA DE CALÇADOS

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS  
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
**ENGENHEIRO MECÂNICO**  
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Cirilo P. Bresolin  
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Energia e Fenômenos de Transporte

Orientador: Prof. Dr. Diogo V. Andrade

Comissão de Avaliação:

Prof. Paulo S. Schneider

Prof. Guilherme H. Fiorot

Prof. Felipe R. Centeno

Porto Alegre, Maio de 2022

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho é fruto de todo o esforço dos meus pais Patrícia e Rinaldo para que eu tivesse condições de chegar até aqui, portanto o principal agradecimento é para eles.

À minha namorada Luiza, que me apoiou e me incentivou.

À minha família e aos amigos que me apoiaram e apoiam ao longo dessa jornada.

Ao Centro Estudantil da Engenharia Mecânica, o CEMEC, pelas experiências e pessoas incríveis que me fez conhecer.

À Máquinas Sazi pela oportunidade, investimento e apoio no desenvolvimento deste trabalho, em especial aos colegas da Engenharia Máquinas.

*Os cientistas estudam  
o mundo como ele é.  
Os engenheiros criam o mundo  
como ele nunca havia sido*

*Theodore von Kármán*

Medeiros, Leonardo. **APRIMORAMENTO DE ESCOAMENTO DE AR EM UM EQUIPAMENTO ESTABILIZADOR DE SOLA DE CALÇADOS**. 2022. 15 páginas. Monografia de Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2022.

## RESUMO

Este trabalho tem como objetivo realizar melhorias em um equipamento estabilizador a frio de solas para indústria calçadista. O escoamento interno do equipamento foi estudado através de ferramentas de mecânica dos fluidos computacional, onde se pretendia aumentar a eficiência de troca de calor do equipamento. Foi criado um modelo inicial, chamado de modelo A, o qual foi modificado com base na análise dos resultados da simulação, dando origem ao modelo B. Repetindo o processo, foi criado o modelo C. A análise do modelo C atendeu às expectativas do projeto. Os resultados obtidos mostram que através do aumento da velocidade do ar na sola do sapato foi possível aumentar em 46,7% o coeficiente de troca de calor convectivo. O resultado indica que a análise numérica é um facilitador para grandes projetos. Também demonstra que a metodologia de melhoria converge para resultados expressivos.

**PALAVRAS-CHAVE:** Calçados, Simulação, Dinâmica dos fluidos, Aperfeiçoamento.

Medeiros, Leonardo. **AIR FLOW IMPROVEMENT OF A SHOES SOLE STABILIZER MACHINE**. 15 pages. Mechanical Engineering End of Course Monography – Mechanical Engineering degree, The Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2022.

## ABSTRACT

This work aims to make improvements in a cold sole stabilizer equipment for the footwear industry. The internal flow was studied through computational fluid mechanics tools, in order to increase the heat exchange efficiency of the machine. An initial model A, was created and then modified based on the analysis of the simulation results, originating model B. Repeating the process, model C was created. The analysis of model C met the expectations of the project. The obtained results show that by increasing the air velocity on the sole of the shoe it was possible to increase the convective heat exchange coefficient by 46.7%. The result indicates that numerical analysis is a facilitator for large projects. It also demonstrates that the improvement methodology converges to expressive results.

**KEYWORDS:** Shoes, Simulation, Fluid Dynamics, Improvement.

## NOMENCLATURA

### Símbolos

$c$	Calor específico	[J (kg°C) <sup>-1</sup> ]
$h$	Coefficiente de transferência de calor por convecção	[W (m <sup>2</sup> K) <sup>-1</sup> ]
$Q$	Calor sensível	[J]
$q''_s$	Fluxo de calor na superfície	[W m <sup>-2</sup> ]
$Nu$	Número de Nusselt	
$Re$	Número de Reynolds	
$Pr$	Número de Prandtl	

### Símbolos gregos

$\rho$	Massa específica	[kg m <sup>-3</sup> ]
--------	------------------	-----------------------

### Abreviaturas e acrômimos

CFD	<i>Computacional Fluid Dynamics</i>
PUR	Poliuretano



## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA.....	1
2.1 O PROBLEMA.....	1
2.2 OBJETIVO .....	5
3. ESTUDO DE CASO .....	5
4. RESULTADOS .....	8
5. CONCLUSÃO.....	15
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	16

## 1. INTRODUÇÃO

A abertura para concorrência direta do mercado internacional, que ocorreu durante a década de 1990 no Brasil trouxe consigo o desafio de não apenas aumentar a produção e a qualidade, como também reduzir o custo do produto final. Os efeitos no setor calçadista não foram diferentes, e a confecção dos calçados passou a ser cada vez mais mecanizada (Santos et al. 1998). Ainda que atualmente tenha-se muita mão de obra envolvida na produção de calçados, os avanços em robótica e as soluções inovadoras têm tomado lugar no processo produtivo.

Dentre os mais variados materiais estudados pela indústria de calçados, destacam-se os sintéticos, principalmente o poliuretano (PUR). A versatilidade dos materiais pertencentes à classe dos poliuretanos advém da capacidade de incorporar outros grupos funcionais na cadeia do polímero, resultando em materiais com propriedades muito distintas que variam desde termoendurecíveis até elastômeros flexíveis, como discutido por Fernandes (2017).

Do ponto de vista dos fabricantes de máquinas, a busca pela inovação trouxe o desafio de produzir equipamentos mais robustos e econômicos, seja reduzindo o desperdício de material ou aumentando sua eficiência energética. Graças aos avanços no poder computacional e nas soluções em simulação (Kumar et al., 2020), a simulação computacional se tornou uma ferramenta de projeto amplamente utilizada, reduzindo custos e tempo dos projetos, além de apontar possíveis falhas que só seriam observadas em protótipos.

O modelo de produção por trilho se mostra muito eficiente para os modelos enxutos com alta produtividade, dessa forma, a substituição de equipamentos com esteiras por equipamentos específicos para trilho é uma solução interessante. No caso dos equipamentos estabilizadores a frio, por exemplo, existia a retirada do calçado do transportador, passagem pelo equipamento e recolocação do equipamento no transportador, dessa forma, acoplando o processo de estabilização do trilho, elimina-se todo processo de retirada e recolocação.

O objetivo do estudo computacional deste trabalho é reduzir os custos com protótipos, além de proporcionar desenvolvimento assertivo de um novo modelo de equipamento eficiente para estabilização a frio de solas para linha de produção de calçados.

## 2. APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA

### 2.1 O PROBLEMA

A produção de calçados depende de vários aspectos do modelo, como material ou tipo de colagem. O modelo básico de produção se divide em corte, costura, conformação do cabedal<sup>1</sup>, moldagem, cola, prensa e estabilização.

A etapa de estabilização se dá após a colagem da sola e prensagem, sendo o último procedimento da linha de montagem. O processo é responsável por reduzir a temperatura da sola, acelerando a cristalização dos polímeros e garantido segurança da qualidade ao desenformar o calçado. Pensando nestes requisitos, foi desenvolvida a máquina estabilizadora a frio para calçados.

Nesta etapa, o calçado se encontra em temperatura ambiente e completamente montado na forma, como é exemplificado na Figura 1. Segundo a NR 15, 32,5 °C é a temperatura máxima do ambiente de trabalho para o ciclo de trabalho do processo de colagem, portanto, será considerada a temperatura de entrada do calçado na máquina estabilizadora. Ao passar pelo equipamento, o calçado será resfriado e a temperatura final da superfície da sola deverá ser de no máximo 20 °C.

---

<sup>1</sup> Parte superior do calçado, é o produto do corte do tecido e é conformada com calor e frio para adquirir o formato do calçado.

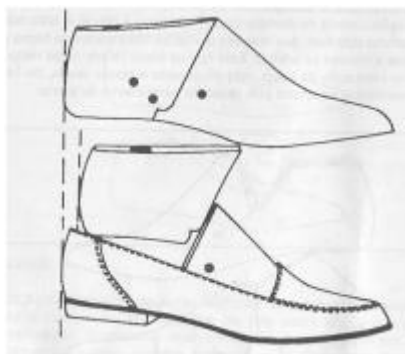


Figura 1. Modelo de forma e modo de encaixe no calçado em produção<sup>2</sup>.

A redução da temperatura do calçado em 12,5 °C tem o intuito de acelerar e induzir a cristalização do polímero da cola. Este foi o primeiro requisito de projeto levantado pelo cliente durante a negociação.

Através das demandas do setor, foi projetado primeiramente o trilho modular como apresentado na Figura 2. O trilho atua como transportador e levará todas as partes de calçados até os postos de trabalho dos processos citados anteriormente. Neste equipamento a distância central é de 80 mm entre os lados de apoio dos carros. Este é um fator limitante do encaixe das máquinas com câmara interna, uma vez que é necessário que o trilho passe por dentro do equipamento. O trilho possui comprimento mínimo de 4 metros quando montado apenas com as duas cabeceiras, podendo se estender em módulos intermediários de 2 metros. Nele são encaixadas as mais variadas máquinas que realizam os processos na linha, como fornos, secadores, ativadores por ultra violeta e resfriadores.

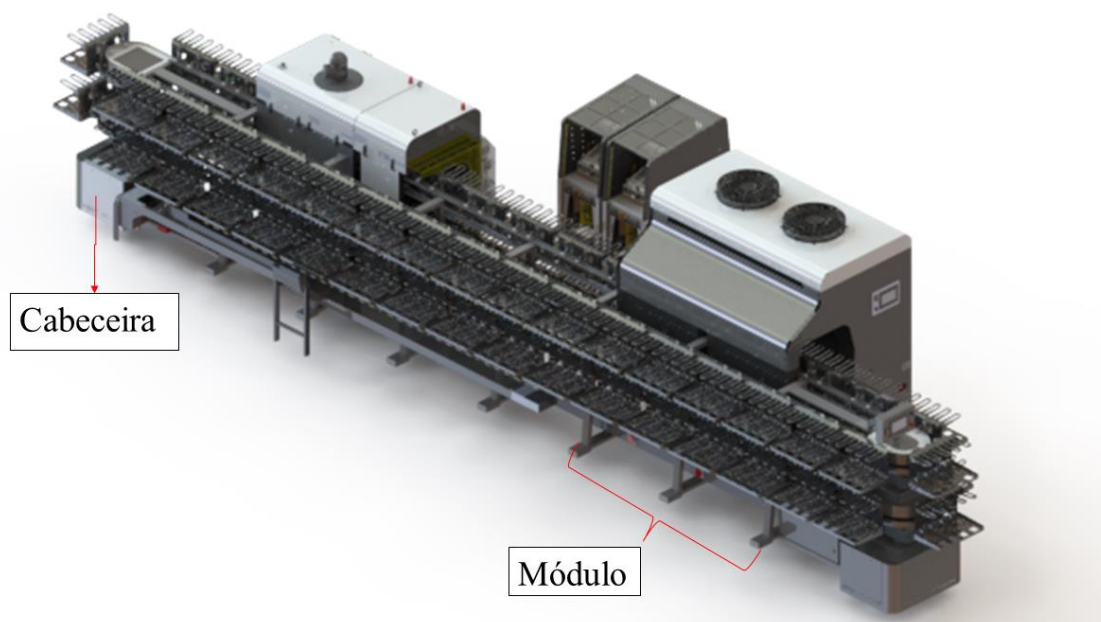


Figura 2. Vista isométrica do trilho com máquinas montadas. Da esquerda para direita há máquinas de secagem e ativação da cola, duas prensas de solas e máquina estabilizadora a frio.

<sup>2</sup>Fonte: ICSAS Manual do formador < [http://icsas-project.eu/wp-content/uploads/2019/07/Lasting\\_PT.pdf](http://icsas-project.eu/wp-content/uploads/2019/07/Lasting_PT.pdf) >

Na Figura 3 se observa o funcionamento básico do trilho. Os carros são encaixados e transportados por correntes. O trilho também conta com dois andares de movimentação. Nota-se o modelo do carro e encaixe do molde do sapato no carro.

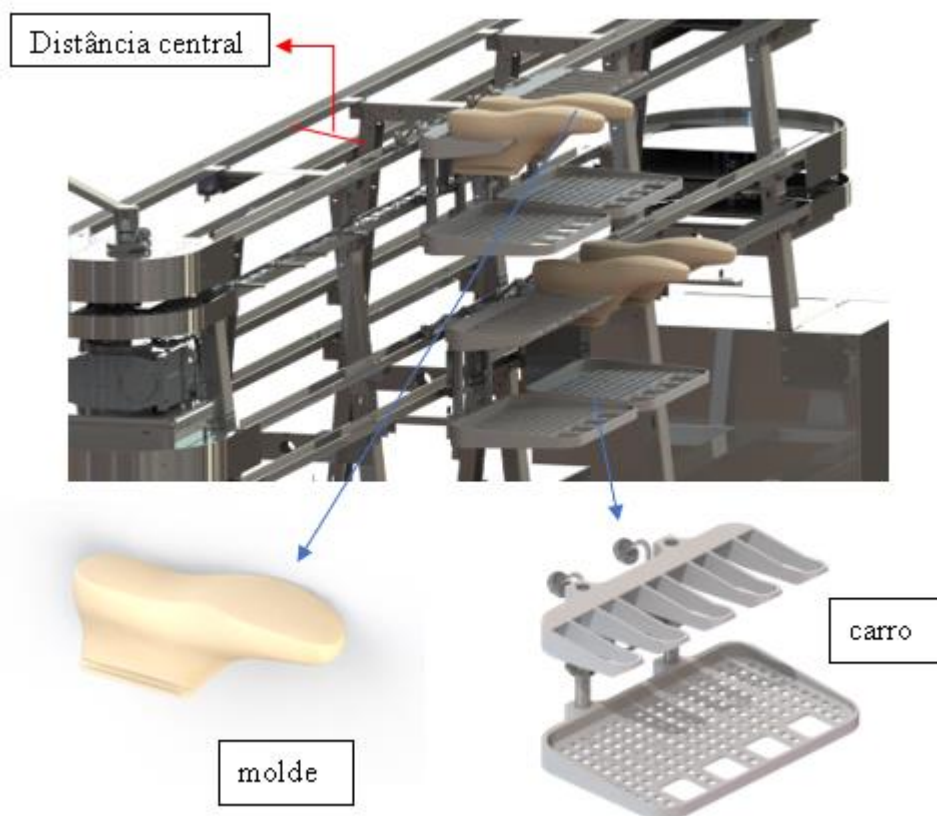


Figura 3. Carros apoiados sobre o trilho. Em destaque, o molde do sapado e o carro do trilho.

Em geral, os equipamentos são alternados por processos manuais como, por exemplo, adição manual de *primer*<sup>3</sup>, devolução à linha para ativação por calor e em seguida aplicação manual de cola. O equipamento encaixado no trilho permite reduzir o tempo e a mão de obra, eliminando o processo de retirada e recolocação do calçado na linha.

Na Figura 4(a) é possível observar a vista lateral do equipamento estudado com a carenagem externa. Observa-se a importância da abertura lateral em relação ao tamanho das formas de calçado. Na imagem, as formas são do tamanho 46<sup>4</sup>, todavia, para mercados externos como os Estados Unidos, há exigência de tamanhos até o tamanho 54<sup>5</sup>.

A Figura 4 (b) mostra a vista do interior do equipamento com os carros e as formas encaixadas em seu translado dentro do ambiente resfriado. O projeto foi pensado para reaproveitamento do jato de ar lançado sobre a sola. Ressalta-se a importância da distância central para o encaixe.

<sup>3</sup> produto para melhorar a adesão da cola e aumentar a resistência na superfície do tecido

<sup>4</sup> Calçados do tamanho 46 têm comprimento de 280 mm.

<sup>5</sup> Calçados do tamanho 54 têm comprimento de 320 mm.

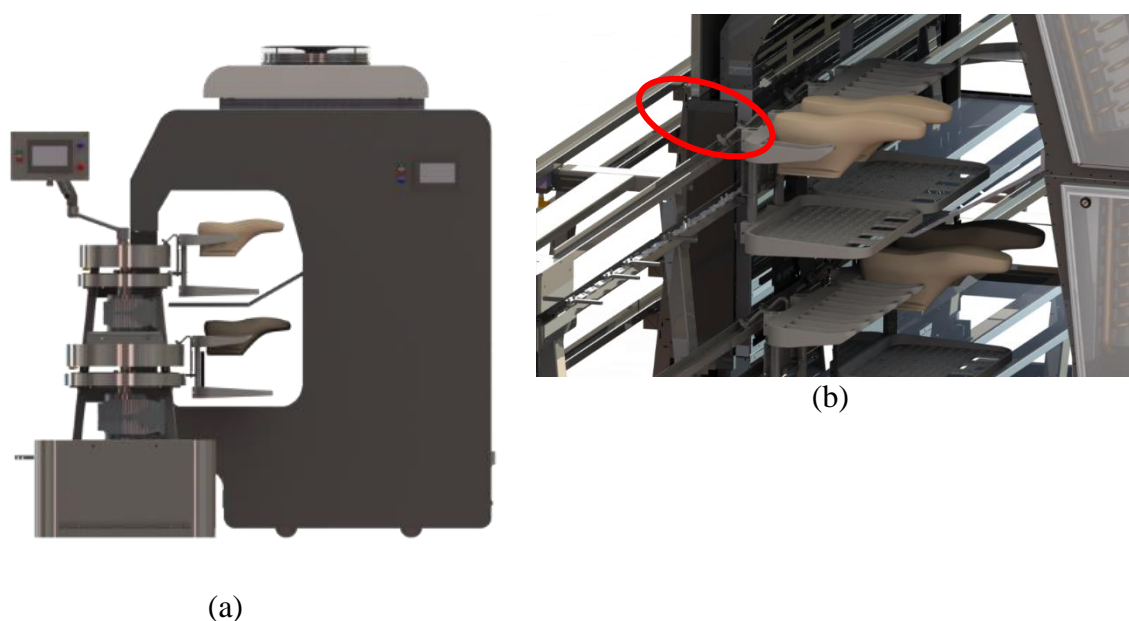


Figura 4. (a) Vista lateral do equipamento montado em trilho (b) Carros com formas no interior do equipamento, em vermelho destacado a exemplificação do tamanho máximo de 50 mm da geometria no centro do trilho.

A cúpula é definida como a câmara interna e seus canais de retorno, acoplada aos ventiladores e evaporadores, onde visa-se manter a temperatura de trabalho prevista. Para tal há isolamento com mantas térmicas de espuma expansiva. A isolamento e o acabamento externo acarretam numa redução de 30 mm no aproveitamento do espaço útil no centro do trilho.

A Figura 5 mostra o esquema de funcionamento ideal do equipamento em vista com corte no eixo central e uma vista isométrica da cúpula. Um fator agravante para o desenvolvimento é a espessura do canal de retorno do ar que é limitado em 50 mm.

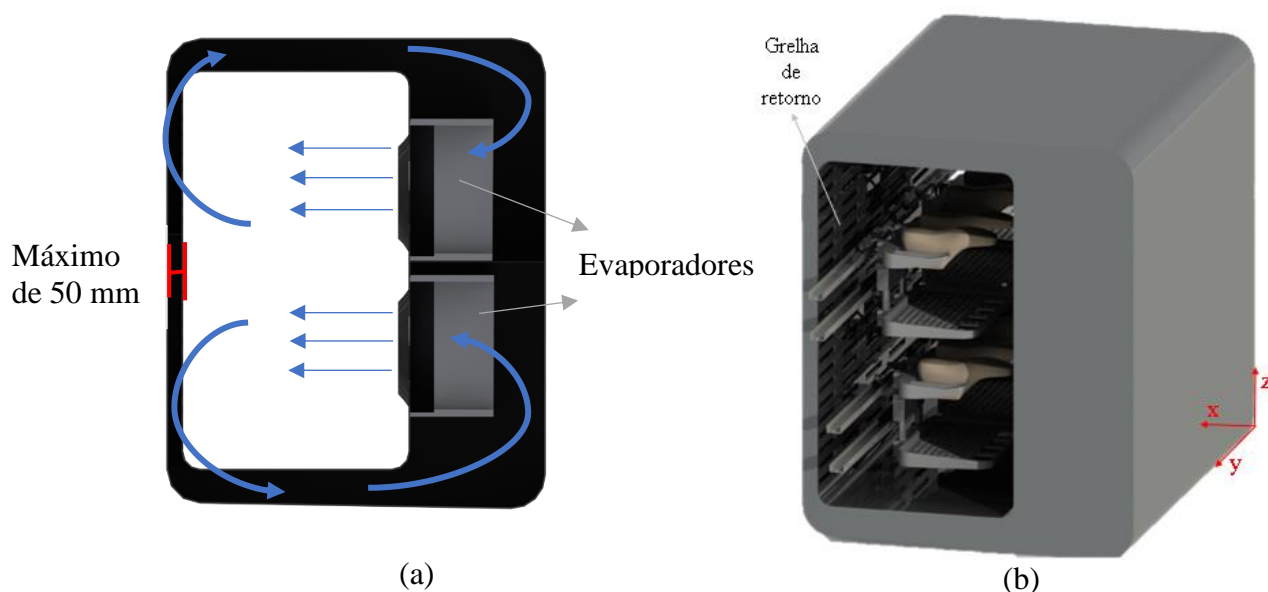


Figura 5. (a) Vista lateral em corte no plano  $xy$  e na coordenada  $y = 900$  mm com modelo ideal de escoamento representado por flechas azuis e largura máxima do encaixe no centro do trilho em vermelho (b) vista isométrica do modelo A com trilho e carrinhos.

Como se pode observar na Figura 6, o comprimento da cúpula é limitado em 1800 mm pelos apoios do módulo. Onde o comprimento correlacionado com a velocidade do trilho de 0,129 m/s levam ao tempo de passagem do calçado de 14 segundos.

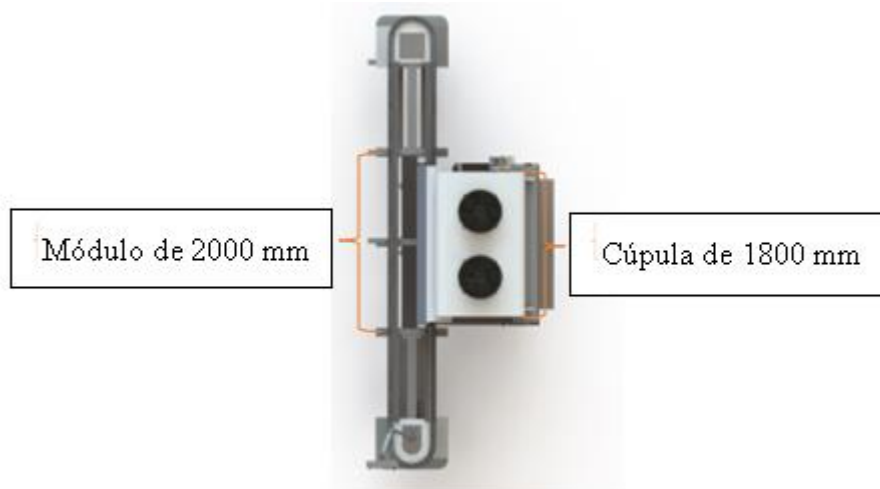


Figura 6. Vista superior da estabilizadora no trilho transportador.

## 2.2 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é realizar melhorias no projeto, tornando-o mais eficiente e propondo maior retorno para o cliente.

Através do software de simulação numérica *Fluid Mechanical Engineering* (FMK), que utiliza como base o código Abaqus, foi proposto um aprimoramento da geometria do equipamento com o objetivo de maximizar a troca de calor da sola e reduzir a troca de calor com o exterior.

A metodologia para otimização seguiu os passos do projeto de desenvolvimento onde foi criado o esboço, chamado de modelo A, que foi simulado e interpretado. Foram propostas alterações, e a partir delas obteve-se o modelo B, que foi novamente simulado. Nele, foram constatados mais requisitos e novas mudanças, originando o modelo C, o qual foi simulado, produzido e passou por análise experimental para validação.

## 3. ESTUDO DE CASO

A sola do sapato do sapato foi considerada plana com 20 mm de espessura e do tamanho 46, ou seja, 280 mm de comprimento e área ( $A$ ) definida em 2750 mm<sup>2</sup>. Definiu-se a massa específica do polímero da sola,  $\rho$ , como 400 kg/m<sup>3</sup> e o calor específico,  $c$ , como 1045 J/kg°C (Engels et al., 2013).

Deste modo estimou-se a necessidade de retirada de calor,  $Q$ , através da equação 1.

$$Q = \rho_{sola} V \cdot c \cdot \Delta T \quad (1)$$

Resultando em 287,38 J por sola onde se encontram até seis carros com duas solas cada, totalizando 3448,5 J por ciclo de operação. Onde o fluxo térmico na superfície da sola se dá pela Equação 2.

$$q''_s = h(T_s - T_\infty) \quad (2)$$

O coeficiente de troca de calor por convecção ( $h$ ), em W/m<sup>2</sup>.K, é definido pela Equação 2, e pode ser aproximado pela equação 3, sendo dependente do número de Nusselt ( $Nu$ ) que

depende dos números de Reynolds ( $Re$ ) e de Prandtl ( $Pr$ ) na analogia de Chilton-Colburn (INCROPERA e DeWITT, 2016).

$$Nu = \frac{hx}{k} = 0,0296Re^{4/5}Pr^{1/3} \quad (3)$$

A correlação é válida para Reynolds até aproximadamente  $10^8$  e para Prandtl entre 0,6 e 60, onde pelas condições estabelecidas, ambos atendem às especificações. O operador pode controlar a capacidade do equipamento conforme a demanda, através do parâmetro de temperatura no evaporador, o qual é monitorado por sensor. Visando o aperfeiçoamento, pode-se melhorar a troca de calor entre o ar e a sola.

Com base nas hipóteses levantadas e nas propriedades do Ar a 250 °K, (INCROPERA e DeWITT, 2016), foi utilizado  $Pr = 0,720$  e o número de Reynolds para saída do tudo de ventilação, equação (4), para verificar a validade da analogia. São esperados valores de Reynolds até um máximo de  $1,44 \cdot 10^7$ .

$$Re_d = \frac{\rho v D}{\mu} \quad (4)$$

O coeficiente convectivo é uma função da velocidade do escoamento. Quando todos outros parâmetros são fixos, quanto maior a velocidade do escoamento, maior o coeficiente de troca de calor por convecção ( $h$ ). Com base nessa informação, a solução do problema tomará como resultado relevante o valor de velocidade na superfície da sola do calçado. Em outras palavras, esse trabalho irá focar na simulação do escoamento do ar sobre o calçado. O objetivo será aumentar a velocidade do ar na superfície do calçado. A simulação da troca de calor entre o calçado e o ar é uma proposta para trabalhos futuros.

A solução do escoamento tem como base as equações de conservação da massa na forma diferencial, Equação 5, e a Equação da quantidade de movimento linear com viscosidade constante ou de Navier Stokes, Equação 7, para escoamento incompressível tridimensional.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho_{ar} \vec{V} = 0 \quad (5)$$

Não se espera velocidades de escoamento acima de 20 m/s, ou seja, tem-se número de Mach igual a 0,059. Com base nesta consideração, utiliza-se a hipótese de fluido incompressível e consequentemente,  $\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$  e  $\rho_{ar}$  é constante e igual a  $1,4224 \text{ kg/m}^3$ .

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (6)$$

$$\rho_{ar} \left[ \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} \right] = \mu \nabla^2 \vec{V} + \nabla P + \rho_{ar} g \quad (7)$$

Para fluidos incompressíveis  $\nabla \cdot \vec{V} = 0$  portanto forma-se o sistema de equações diferenciais parciais que pode ser descrito como:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vu)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho wu)}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left[ \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right] \quad (6a)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho wv)}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial y} + \mu \left[ \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right] \quad (6b)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho ww)}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial z} + \mu \left[ \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right] + \rho g_z \quad (6c)$$

Onde as incógnitas são pressão ( $P$ ), medida em Pa, e velocidades em  $x$  ( $u$ ),  $y$  ( $v$ ) e  $z$  ( $w$ ), medidas em m/s.

Mesmo o projeto sendo para uma situação com movimento, não há possibilidade de simular o movimento dos carros no software utilizado. Desta forma, foi utilizada a hipótese de uma situação com os carros parados. Com esta informação, pode-se afirmar que não há variação ao longo do tempo, configurando regime permanente. Assim o sistema de equações (6) pode ser simplificado em relação ao tempo ( $t$ ).

$$\frac{\partial(\rho uu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vu)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho wu)}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left[ \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right] \quad (7a)$$

$$\frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho wv)}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial y} + \mu \left[ \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right] \quad (7b)$$

$$\frac{\partial(\rho uw)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho ww)}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial z} + \mu \left[ \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right] + \rho g_z \quad (7c)$$

O escoamento foi considerado completamente turbulento e o modelo de turbulência utilizado foi o sst k- $\omega$ , introduzido por Menter (1994). Neste modelo, mesmo que  $\omega$  varie com maior velocidade que o  $\epsilon$ , do modelo k- $\epsilon$ , previne excessiva tensão de cisalhamento nas camadas adjacentes através dos termos introduzidos no modelo. Desta forma reduz a propagação de erros.

O FMK utiliza o método de integração implícita de segunda ordem para solucionar as equações. A principal vantagem deste método é sua estabilidade para sistemas lineares.

Foi proposta uma malha mista para modelagem do volume de controle, com foco em elementos hexaédricos. A malha foi refinada próxima das geometrias mais complexas para criar o contorno com maior precisão. A malha utilizada contou com elementos majoritariamente hexaédricos, mais de 97%, além de alguns elementos piramidais para preencher lacunas onde os elementos hexaédricos não foram capazes de atender os parâmetros de qualidade definidos.

A avaliação da independência da malha foi realizada através do método do índice de convergência de malha (GCI – *grid convergence index*) proposto por Roache (1994). O método visa obter aproximação assintótica da incerteza através do processo de refinamento.

Foram criadas quatro malhas, cujas características são apresentadas na Tabela 1, observando os critérios de qualidade aliado ao custo computacional.

Tabela 1. Características das malhas criadas

	Tamanho máximo(mm)	Tamanho mínimo(mm)	Número de nós
<b>Malha 1</b>	120	15	838258
<b>Malha 2</b>	80	12	1409072
<b>Malha 3</b>	60	8	3491908
<b>Malha 4</b>	60	4	6388737

Utilizando valores conservadores dos parâmetros propostos por Roache (1994), foram obtidos resultados bastante satisfatórios para convergência das malhas. Os dados foram coletados através da adição de quatro sensores de velocidade na ponta do modelo do calçado conforme apresentado na Figura 7. Os valores de convergência apresentados na Tabela 2 levaram a escolha da malha 3 para utilização na continuidade do trabalho. Na Figura 7 é possível observar em corte na zona de contorno do calçado o refino de malha, esta é a zona mais sensível para os resultados do estudo.

Conforme apresentado na Tabela 2 o resultado do refino das malhas 3 para 4 foi o mais satisfatório, obtendo-se um valor GCI de 0,0015 em virtude da muito pequena variação nos resultados confirmando a eficiência da malha 3, a qual possui custo computacional mais acessível. Utilizando um computador com 16 núcleos para processamento da simulação a duração do modelo foi de aproximadamente 13 horas, o modelo foi considerado convergente quando o erro foi inferior a 0,2% entre as últimas 15 iterações, totalizando 2478 iterações.



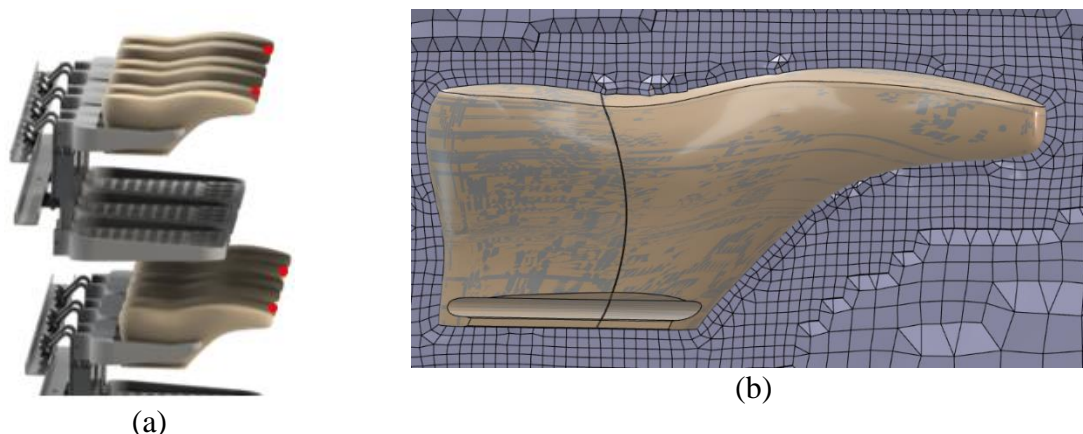


Figura 7. (a) Pontos de medição para controle do refino de malha demonstrados como pontos em vermelho. (b) Detalhe do refino de malha no contorno do calçado.

Tabela 2. Resultados da independência de malha

	Erro relativo	Grau de refino	GCI
<b>Malha 1-2</b>	0,02951	1,6	0,1844
<b>Malha 2-3</b>	0,00629	2	0,0369
<b>Malha 3-4</b>	0,00025	1,8	0,0015

As condições de contorno utilizadas sugerem que as aberturas são zonas de pressão 0 e livres para o escoamento, nas paredes foi utilizada condição de não deslizamento ( $v = 0m/s$ ). A perda de carga foi modelada através da rugosidade do aço polido, uma vez que o material da cúpula é de INOX, ou seja, 0,002 mm. Os ventiladores foram modelados por superfícies transparentes ao escoamento e que proporcionam diferença de pressão relativa a sua curva de funcionamento. A sola do sapato

#### 4. RESULTADOS

Os resultados obtidos do modelo A (apresentado anteriormente na Figura 5) foram analisados através dos dados obtidos de velocidade e pressão manométrica. A distribuição desses parâmetros é ponto chave na análise do problema.

A Figura 8 mostra os vetores de velocidade no corte no centro do equipamento. É possível observar que a ideia de recirculação de fluido acontece, i.e., o jato dos ventiladores é captado pela parede perfurada e retorna para o evaporador. Esta movimentação é uma das características que tornam o equipamento mais eficiente, uma vez que o ar no interior do equipamento está em uma temperatura menor que o ar do exterior. Ainda se observa que o direcionamento do jato acontece principalmente no cabedal, quando o objetivo é direcioná-lo para a sola.

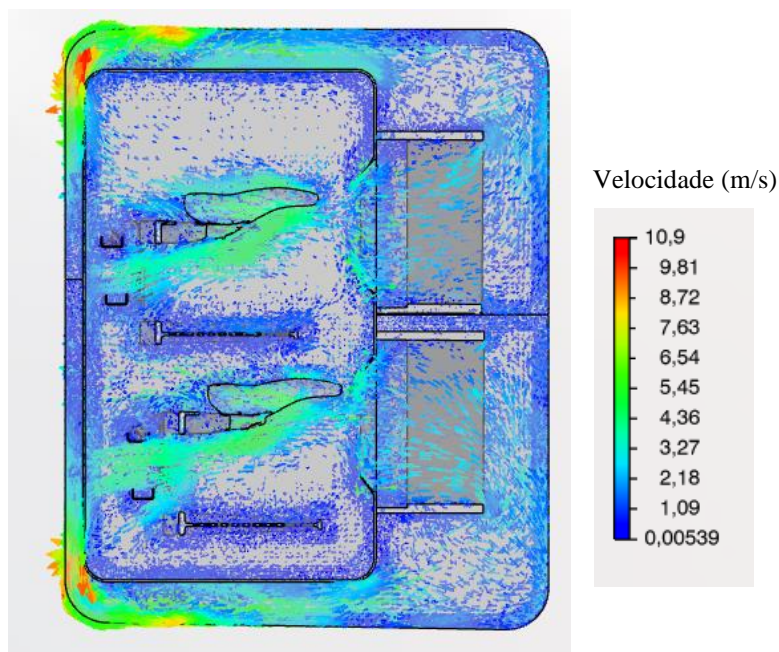


Figura 8. Vetores de velocidade no plano  $xz$  e na coordenada  $y = 900 \text{ mm}$  do Modelo A.

Observou-se valores de velocidade entre 3 e 4 m/s no jato de ar em contato com a sola, sendo os maiores valores próximos ao bico do sapato, ou seja, mais próximos do ventilador.

Na Figura 9 através da análise das diferenças de pressão no corte central confirma-se a formação da célula convectiva conforme o esperado, um ponto de observação é a pressão positiva no interior da câmara indicando possíveis perdas para o meio externo, teoria que é endossada na Figura 10 onde é possível observar os vetores de velocidade em direção a abertura lateral formando uma linha de corrente para o exterior.

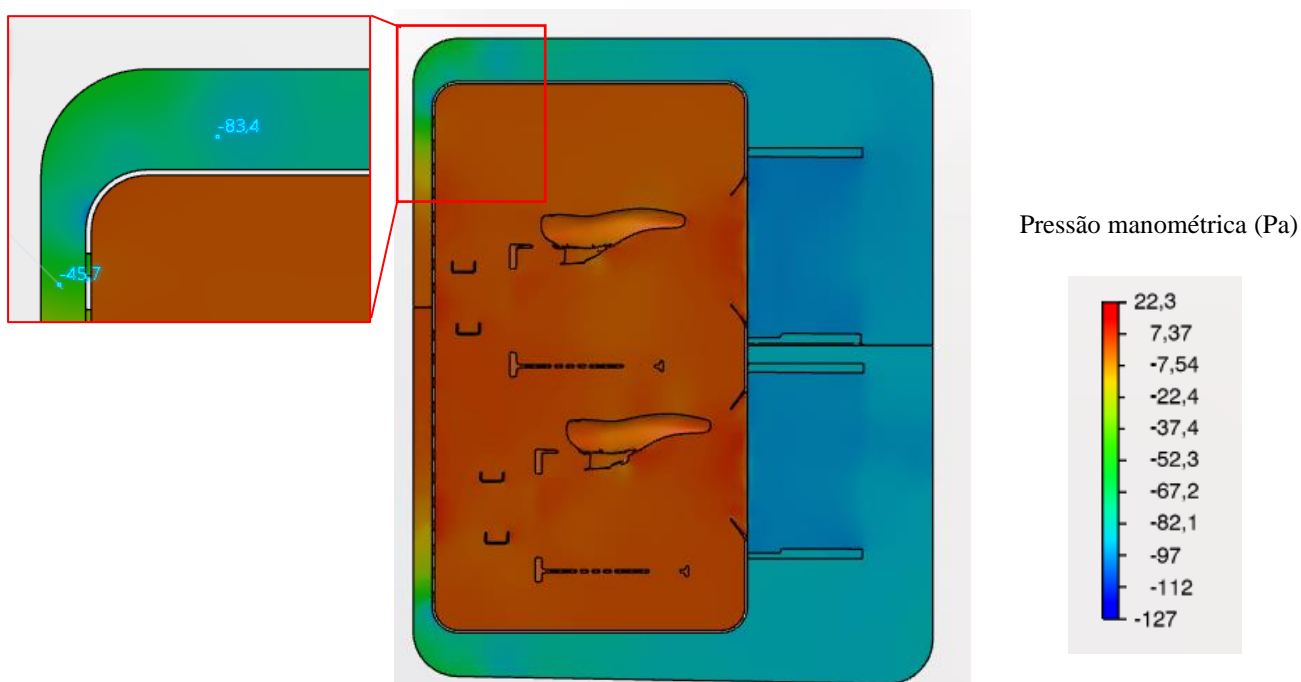


Figura 9. Corte no plano  $xz$  na coordenada  $y = 900 \text{ mm}$  mostra os valores de pressão manométrica do Modelo A. Em detalhe a perda de carga acentuada nos cantos de  $90^\circ$ .

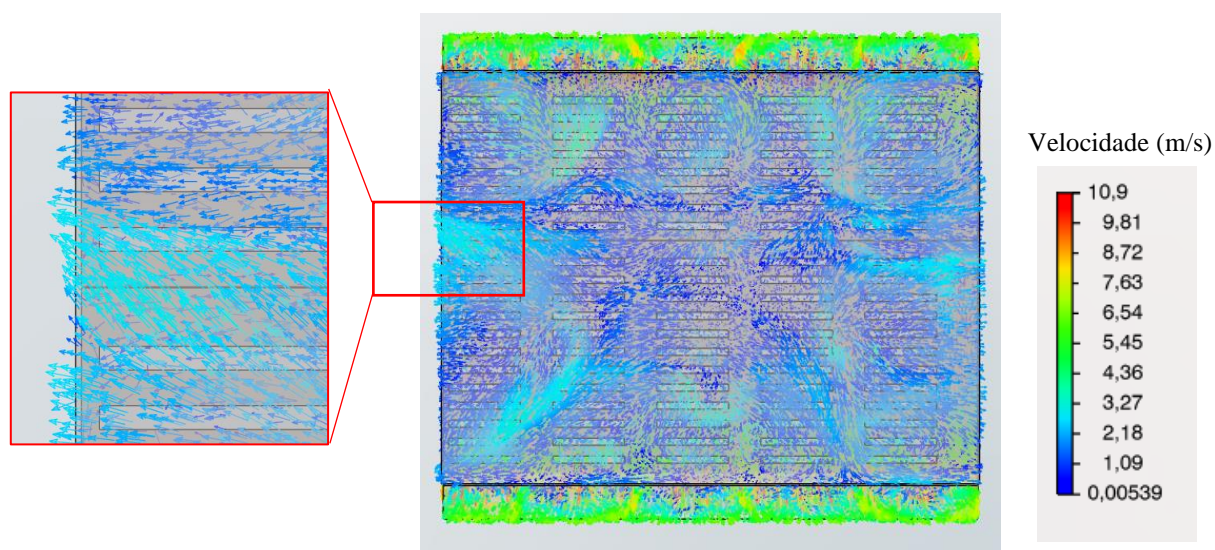


Figura 10. Corte do campo de vetores de velocidades do modelo A próximo a parede de retorno mostrando escoamento para o exterior. Plano  $zy$ , corte em  $x = 500 \text{ mm}$ .

A análise dos resultados do modelo A evidenciou alguns pontos que foram melhorados para o modelo B. Elencou-se então três alterações para o modelo B visando corrigir os pontos encontrados no modelo anterior: (i) Alteração do ângulo dos ventiladores em  $15^\circ$  em relação a vertical com o fim de direcionar melhor o jato de ar e proporcionar o foco do jato na sola; (ii) Redução no raio de saída do duto de ventilação de 150 mm para 100 mm, restringindo a área de saída do escoamento aumenta-se a velocidade e conseqüentemente o coeficiente convectivo ( $h$ ). Previu-se maior perda de carga neste ponto, o que deverá ser avaliado com os resultados do modelo B; (iii) O aumento do raio da curva no retorno. Notou-se um ponto de concentração de baixa pressão com o ângulo da curva no retorno em  $90^\circ$  e raio pequeno, assim, causando grande perda de carga no escoamento. Observando este ponto foi proposta alteração da dobra de curva  $90^\circ$  com raio 50 mm para duas dobras mais suaves de  $45^\circ$  com raio equivalente a 100 mm. As propostas de alterações podem ser vistas na Figura 11.

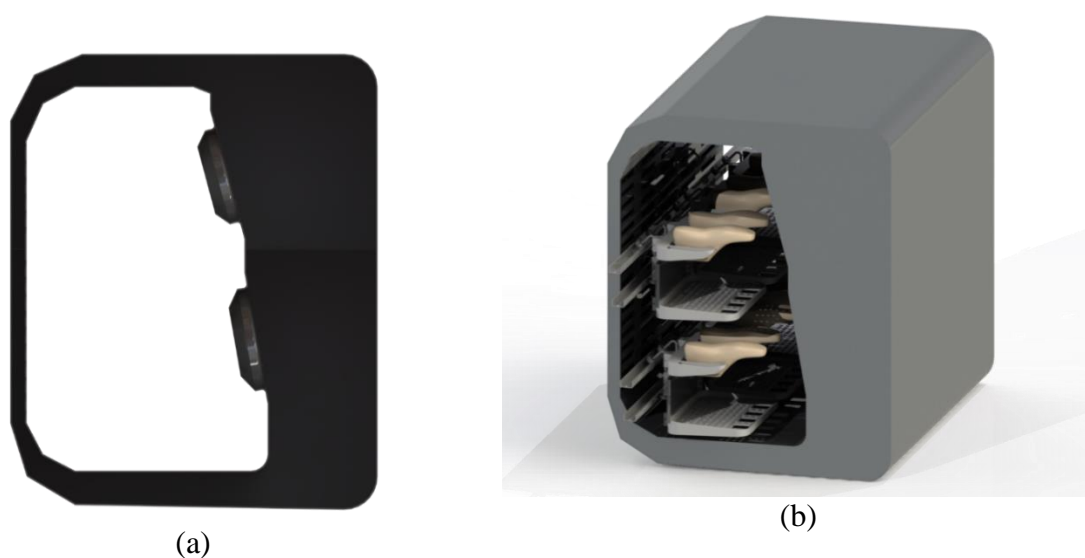


Figura 11. (a) Modelo B em vista lateral cortada no plano  $xz$  em  $y = 900 \text{ mm}$  (b) Modelo B em vista isométrica sobre trilho.



Foi realizada simulação no modelo B com parâmetros semelhantes ao modelo A. A Figura 12 apresenta vetores de velocidade no corte central. É possível observar valores superiores ao modelo A, de até 9 m/s na região de contato com a sola.

Assim como no modelo A, foi novamente avaliado o comportamento próximo da parede de retorno do ar. Desta maneira a Figura 13 representa o campo de vetores de velocidades no  $xy$  próximo da grelha de retorno do ar.

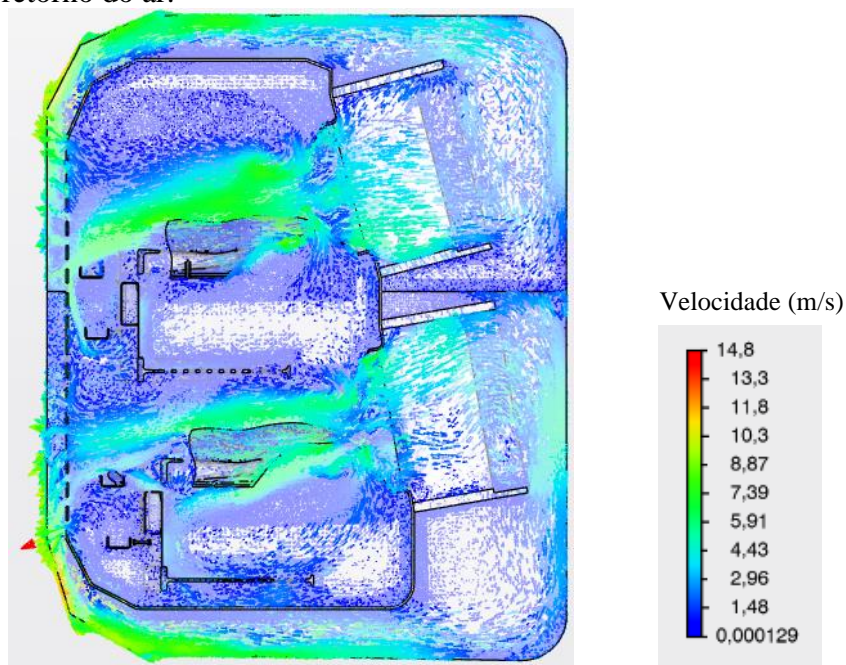


Figura 12. Vetores de velocidade no plano  $xz$  e na coordenada  $y = 900 \text{ mm}$  do Modelo B.

Na Figura 13 é possível verificar que mesmo com as modificações o problema do escoamento para fora do interior não foi solucionado. Verificou-se que ainda há linhas de corrente para o exterior. Obedecendo a conservação de massa, se há escoamento do interior para o exterior, o contrário também tem que ser verdadeiro.

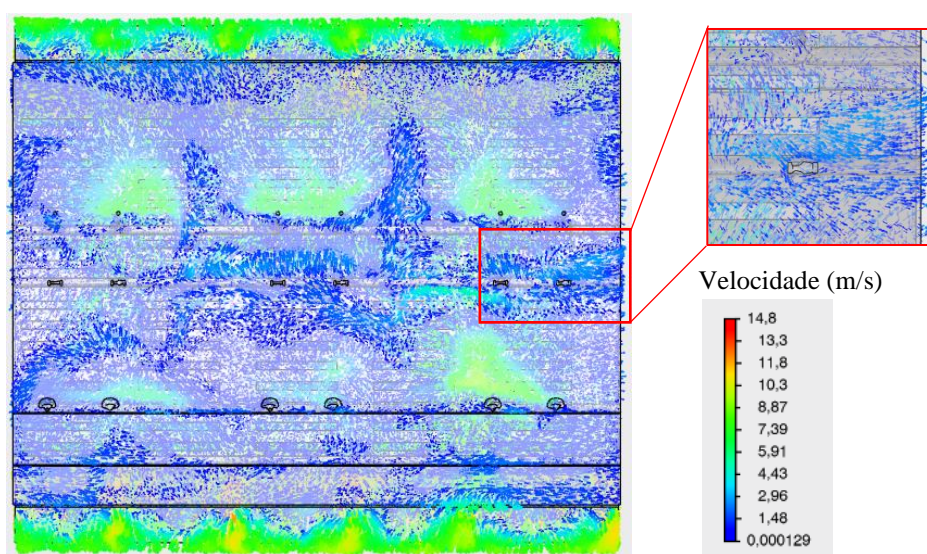


Figura 13. Corte do campo de vetores de velocidades do modelo B próximo a parede de retorno mostrando escoamento para o exterior. Plano  $zy$ , corte em  $x = 500 \text{ mm}$ .

A Figura 14 apresenta os resultados de pressão manométrica, observa-se que a perda de carga foi reduzida com o aumento do raio da curva, onde a distribuição está mais uniforme, solução que também facilitou o processo de fabricação. Da mesma maneira como no Modelo A, a pressão é positiva dentro da câmara indicando que há escoamento para o exterior onde a pressão manométrica é 0 Pa.

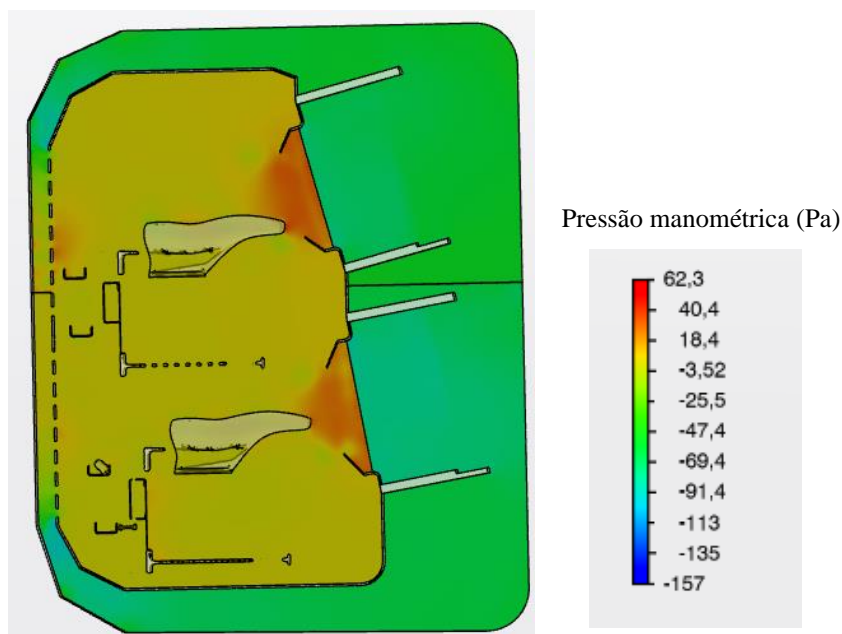


Figura 14. Corte no plano  $xz$  na coordenada  $y = 900 \text{ mm}$  mostra os valores de pressão manométrica do Modelo B.

Também foi observada a necessidade de aumentar a área aberta da grelha de retorno, que atua como um limitador para o fluxo do retorno do ar refrigerado.

Neste ponto do desenvolvimento foram levantadas novas variáveis pelo cliente durante a validação do projeto, como a possibilidade de trabalhar com apenas uma parte do equipamento, em momento de baixa produção, sem acarretar grandes perdas de energia. Também a redução da largura total da máquina eixo  $z$  para aproveitamento de espaço, que foi solucionada através da alocação dos compressores abaixo da cúpula.

Concomitantemente foi observada a necessidade da presença do cavalete central dentro do estabilizador por conta da solicitação estrutural do trilho. Assim deu-se origem ao modelo C, apresentado na Figura 15, com uma geometria mais compacta e maior aproveitamento da área fabril.

Foi realizada simulação no modelo C com parâmetros semelhantes aos modelos A e B. O modelo C necessitou de um número um pouco maior de elementos na malha pois foi adicionado o cavalete do trilho e bandeja divisora.

Os resultados do Modelo C foram bastante satisfatórios. A Figura 16 mostra os vetores de velocidade no corte central do plano  $xz$ . Pode-se observar valores de velocidade na superfície da sola de até 11 m/s. Considerando a equação 3 obteve-se um aumento de 46,7% no coeficiente  $h$  em relação ao Modelo A. Ainda que a relação de Chilton-Colburn seja uma aproximação empírica mostra que o objetivo global está sendo atingido.

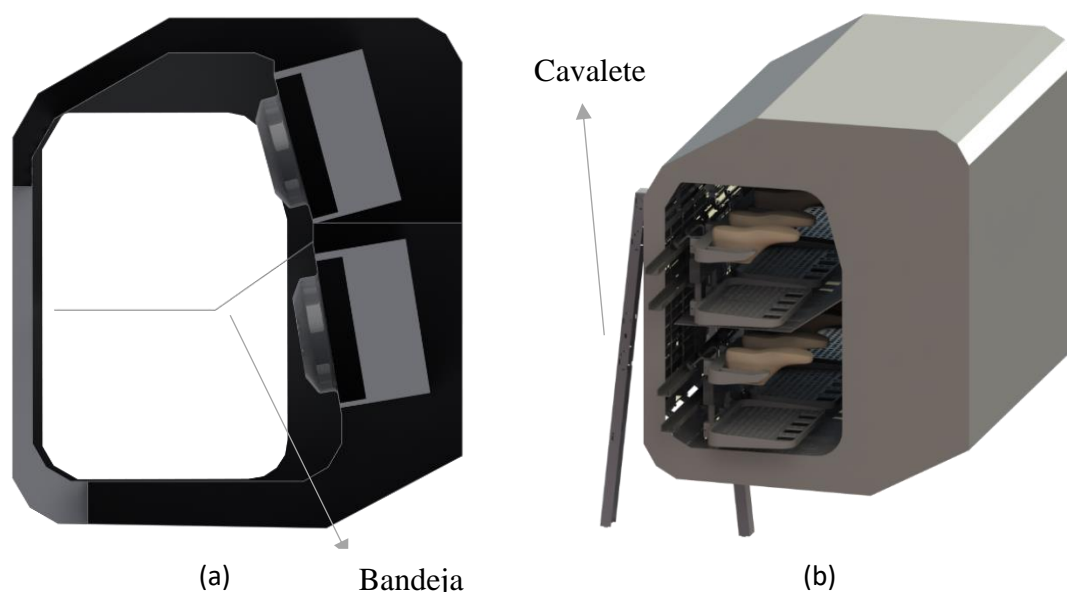


Figura 15. (a) Modelo C em vista lateral cortada no plano  $xz$  em  $y = 900 \text{ mm}$  (b) Modelo C em vista isométrica sobre trilho.

A comparação com os modelos anteriores mostra uma nova melhoria, a Figura 17 apresenta o Corte do campo de vetores de velocidades do Modelo C na região de pressão positiva próxima da grelha de retorno do ar. Foi observado que as linhas de corrente para o exterior não se formam explicitamente como nos modelos A e B. Ainda que existam zonas de recirculação com o exterior a redução é notória.

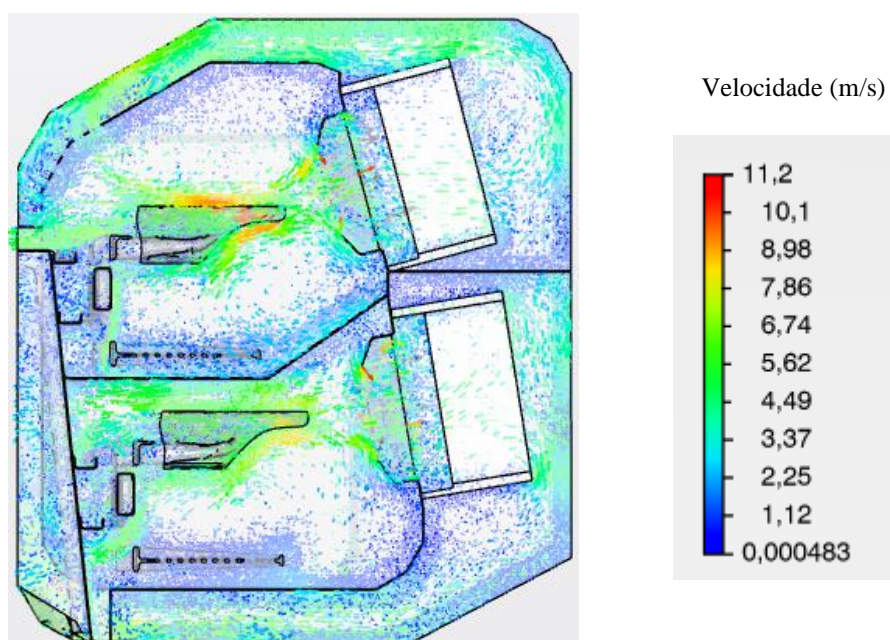


Figura 16. Vetores de velocidade no plano  $xz$  e na coordenada  $y = 900 \text{ mm}$  do Modelo C.



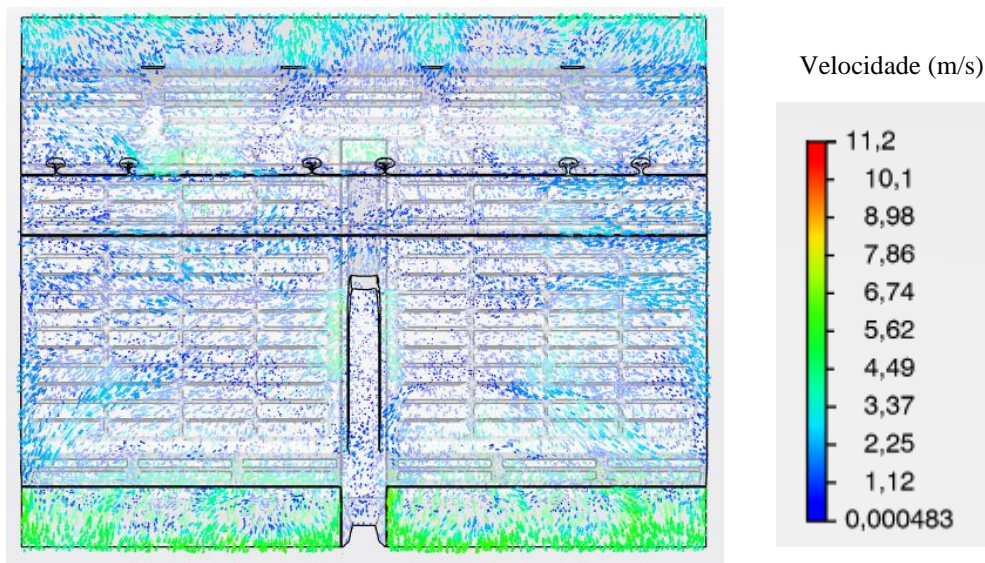


Figura 17. Corte do campo de vetores de velocidades do modelo C próximo a parede de retorno mostrando escoamento para o exterior. Plano  $zy$ , corte em  $z = 500 \text{ mm}$ .

Na Figura 18 apresenta o campo de pressão manométrica do Modelo C. A cúpula concentra pressão muito próxima de 0 Pa, esta análise é valiosa pelo contato com o exterior que está a 0 Pa. Concordando com o resultado apresentando na Figura 17.

O aumento da grelha de retorno do ar resultou na melhor distribuição da pressão no sistema o que indica menor perda de carga em pontos específicos, como mostrado na Figura 9, presente nos modelos anteriores. Também melhorando o reaproveitamento do ar refrigerado.

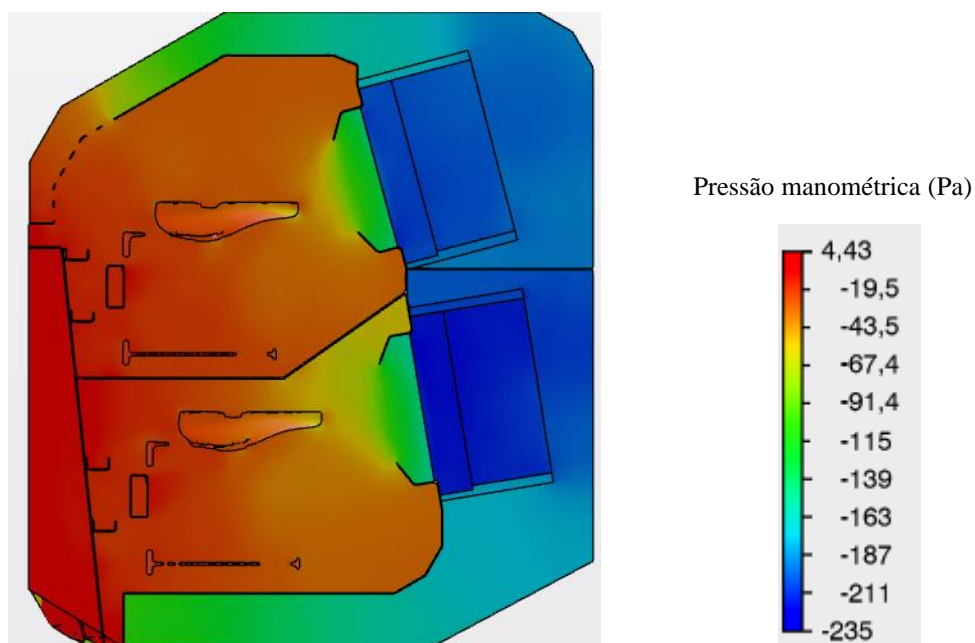


Figura 18. Corte no plano  $xz$  na coordenada  $y = 900 \text{ mm}$  mostra os valores de pressão manométrica do Modelo C.

Após a conclusão das simulações, foi fabricado um protótipo do Modelo C e testes preliminares foram realizados. Os resultados dos testes preliminares do protótipo podem ser vistos no Apêndice A. Pode-se observar nesses resultados a eficácia do equipamento, fato que

indica o sucesso da simulação como uma viável abreviação de projetos complexos e redução de custos para fabricação de protótipos.

## 5. CONCLUSÃO

Nesse projeto foram realizadas simulações fluidodinâmicas de um equipamento estabilizador de sola de calçados. O objetivo das simulações era encontrar um modelo adequado para aprimorar o processo de troca de calor nas solas dos sapatos.

A evolução entre os modelos foi, naturalmente, revelando os pontos a serem melhorados, o que demonstra que o método utilizado converge para uma solução robusta, ainda que não seja a solução otimizada.

Do ponto de vista dos objetivos específicos, destaca-se a velocidade do ar em relação à sola do sapato onde foram atingidos valores mais de duas vezes maiores que no esboço inicial. Os resultados de testes preliminares mostram que o equipamento é plenamente capaz de realizar o trabalho para o qual foi projetado.

Do ponto de vista da eficiência, o equipamento se mostrou muito efetivo. Através da adição de cortinas de Policloreto de Vinila (PVC), pôde ser anulada a corrente do interior para o exterior, além do retorno de ar aquecido pelo exterior.

Com as melhorias realizadas nestes pontos, é possível trabalhar com menor temperatura no evaporador, reduzindo o tempo de funcionamento do compressor, e assim diminuir o consumo de energia elétrica, gerando retorno ao cliente.

O trabalho consolida a solução numérica como uma solução robusta para o setor calçadista, onde ainda há vasto terreno para ser explorado. O projeto foi concluído com êxito e o produto terá larga aplicação nas produções de calçados.

Como trabalhos futuros, propõe-se a utilização do modelo térmico para aplicação de material específico e confidencial de clientes e precisão do tempo de espera para retirada da forma. Também a busca por modelo com simulação de movimento dos carros.



## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRASIL. Ministério do Trabalho. **NR-15 Anexo 3 - Limite de tolerância para exposição ao calor**. Portaria MTP nº 426 de 08 de Outubro de 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/trabalho-e-previdencia/pt-br/composicao/orgaos-especificos/secretaria-de-trabalho/inspecao/seguranca-e-saude-no-trabalho/normas-regulamentadoras/nr-15-atualizada-2021.pdf>

ENGELS, H.W.; PIRKL, H.G.; ALBERS, R.; ALBACH, R. W.; KRAUSE, J.; HOFFMANN, A.; CASSELMANN, H., DORMISH, J. **Polyurethanes: Versatile materials and sustainable problem solvers for today's challenges**. Angewandte Chemie - International Edition, 2013.

FERNANDES, I.P. **Novos Materiais para Calçado Baseados em Poliuretanos e Poliureias**. 2017. Dissertação (Doutorado), Engenharia Química e Biológica, Universidade do Porto, Faculdade de Engenharia, Porto, 2017. Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/102717/2/181621.pdf>

INCROPERA, F.P.; DEWITT, D.P. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**, 7ª edição, LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S. A., Rio de Janeiro, Brasil, 2017.

KUMAR J.; TIWARI G., RAWAT A. **Computational investigation of erosion wear on industrial centrifugal pump handling solid-water flows**. Tribol. Ind. (2020), 10.24874/ti.803.11.19.06

MENTER, F. **Two Equation Eddy-Viscosity Turbulence Modeling for Engineering Applications**. AIAA Journal, 32 (1994), pages 1598-1605. <http://dx.doi.org/10.2514/3.12149>

ROACHE, P.J.; K. GHIA; F. WHITE. **Editorial Policy Statement On The Control Of Numerical Accuracy**. ASME Journal of Fluids Engineering, vol. 108, no. 1., 1986.

SANTOS, M. E. R.; CUNHA, N. C. V.; GRAZIADIO, T.; SCHMITT, L. **A capacidade tecnológica de uma facção de calçados: o caso da Solasul**. In: 17º Encontro Nacional dos Programas de Pós-graduação em Engenharia de Produção, 1997, Gramado-Brasil.

## Apêndice A – Protótipo

Os estudos desenvolvidos no trabalho deram origem ao protótipo do modelo de máquina estabilizadora a frio para calçados. O protótipo foi construído e foram realizados testes preliminares com medições de temperatura.

A Figura 19 mostra o protótipo em exposição na Feira FIMEC de 2022, em Novo Hamburgo.



Figura 19. Protótipo em exibição na Feira FIMEC 2022.

O protótipo foi montado em linha conforme a utilização real, com máquinas ativadoras para aquecimento e secagem da cola a quente. Os testes preliminares foram realizados com um dos sapatos com forma disponível para exposição.

A Figura 20 mostra a temperatura de entrada do calçado no equipamento estudado. A temperatura foi medida com um termovisor da marca Flir, modelo E40 ajustado para leitura de polímero opaco escuro. A temperatura medida de entrada da sola no equipamento foi de aproximadamente 29,5 °C, muito parecida com a temperatura considerada em projeto.



Figura 20. Temperatura de entrada da sola na máquina.

Na Figura 21 observa-se a medição da temperatura na saída do equipamento. O resultado foi a medição de 19,7°C na superfície da sola após a passagem no equipamento. Uma diferença de 9,8°C que apresenta um resultado muito positivo com base nos objetivos traçados.

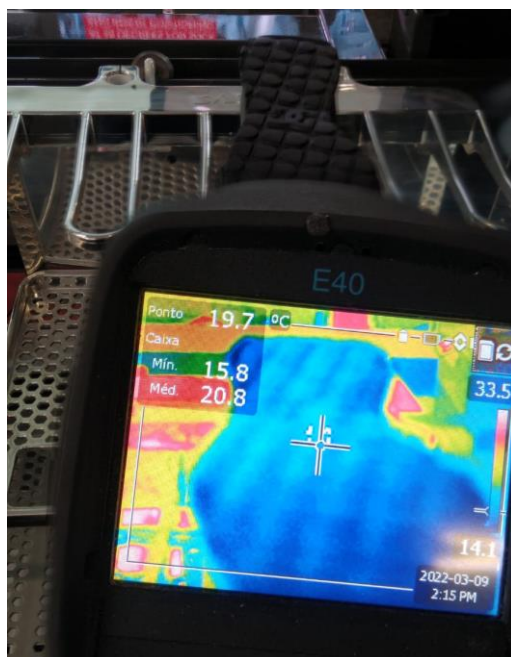


Figura 21. Temperatura de saída da sola na máquina.