



HÉRLON MANOLLO CÂNDIDO GUEDES

**EXPLORAÇÃO CONTEXTUAL DE FÓRMULAS
MATEMÁTICAS NA WEB PARA PESSOAS COM
DEFICIÊNCIA VISUAL EM LEITOR DE TELAS DE CÓDIGO
ABERTO**

LAVRAS – MG

2020

HÉRLON MANOLLO CÂNDIDO GUEDES

**EXPLORAÇÃO CONTEXTUAL DE FÓRMULAS MATEMÁTICAS NA WEB PARA
PESSOAS COM DEFICIÊNCIA VISUAL EM LEITOR DE TELAS DE CÓDIGO
ABERTO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação, linha de pesquisa de Banco de Dados e Engenharia de Software, para a obtenção do título de Mestre.

Prof. DSc. André Pimenta Freire
Orientador

**LAVRAS – MG
2020**

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca Universitária da UFLA, com dados informados pelo próprio autor

Guedes, Hérlon Manollo Cândido

Exploração Contextual de Fórmulas Matemáticas na Web para Pessoas com Deficiência Visual em Leitor de Telas de Código Aberto / Hérlon Manollo Cândido Guedes. – Lavras : UFLA, 2020.

103 p. : il.

Dissertação–Universidade Federal de Lavras, 2020.

Orientador: Prof. DSc. André Pimenta Freire.

Bibliografia.

1. Acessibilidade em Sistemas Digitais. 2. Acessibilidade em Fórmulas Matemáticas. 3. Software Leitor de Telas. 4. Tese. 5. Trabalho Científico – Normas. I. Pimenta Freire, André. II. Título.

HÉRLON MANOLLO CÂNDIDO GUEDES

**EXPLORAÇÃO CONTEXTUAL DE FÓRMULAS MATEMÁTICAS NA WEB PARA
PESSOAS COM DEFICIÊNCIA VISUAL EM LEITOR DE TELAS DE CÓDIGO
ABERTO**

**CONTEXTUAL EXPLORATION OF MATHEMATICAL FORMULAE ON THE WEB
FOR PEOPLE WITH VISUAL DISABILITIES IN AN OPEN-SOURCE SCREEN
READER**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação, linha de pesquisa de Banco de Dados e Engenharia de Software, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 26 de Novembro de 2020.

Profa. DSc. Paula Christina Figueira Cardoso UFLA
Prof. DSc. Willian Massami Watanabe UTFPR



Prof. DSc. André Pimenta Freire
Orientador

**LAVRAS – MG
2020**

"Dele, por Ele e para Ele são todas as coisas. A Ele a glória por toda a eternidade!

Amém."Rm 11, 36.

AGRADECIMENTOS

"Porque todo aquele que pede, recebe. Quem busca, acha. A quem bate, abrir-se-á."(Mt 7, 8).

Agradeço à Deus pela graça da vida, por cada oportunidade e pelo cuidado tão singelo, belo e gracioso para com a minha vida. Agradeço à Virgem Maria - da qual eu sou filho e escravo - pelo amor, intercessão e por cuidar dos meus passos, os quais me trouxeram até aqui.

Agradeço à toda minha família, em especial aos meus pais, Vicente e Valdirene, pela força ofertada, pelas horas de conversa que esclareceram minha visão quando tudo parecia escuro. Pelas palavras que inspiraram confiança em tantos momentos onde o medo batia forte. Agradeço aos senhores por nunca desistirem de oferecer o seu melhor, por viverem do pouco para nos dar o muito, por lutarem de sol a sol para que o sol da nossa vida não parasse de brilhar. Por nos ensinarem que a luta é o que constrói a vitória.

Agradeço ao meu irmão, Hyan, pelo cuidado comigo, pelas palavras de força durante todo o mestrado e principalmente por sempre estar ao meu lado me sustentando e dando o ombro pra que eu não caminhasse só.

Agradeço à minha noiva Letícia que nos momentos de desespero me deu a calma, nos momentos de raiva a paciência e de desolação o cuidado. Obrigado por estar ao meu lado e ser para mim um porto seguro. Agradeço pela compreensão nos momentos em que eu precisava abrir mão de estar com você para dar seguimento aos estudos e pesquisas.

Agradeço aos meus amigos que me impulsionaram durante o caminho dessa conquista.

Agradeço à UFLA e ao Governo Federal pelo suporte ofertado durante o mestrado. Ao departamento de Ciência da Computação pela estrutura oferecida.

Agradeço ao Governo Canadense que através do programa ELAP, me proporcionou a possibilidade de ter a experiência de trabalhar em um projeto de pesquisa na Ontario Tech University, em Oshawa, onde pude não só me aprimorar no caminho da ciência como crescer profissionalmente.

Por fim, agradeço ao meu orientador, Dr. André Pimenta Freire, por ser paciente, compassivo e por me direcionar durante esse tempo decisivo da minha formação. Agradeço ao Dr. Patrick Hung, por me orientar durante a realização do projeto na Ontario Tech University.

Totus Tuus ego sum Mariae et omnia mea Tua sunt.

(São Luís Maria Grignion de Montfort)

RESUMO

A evolução de recursos tecnológicos tem ampliado o acesso à informação para todos, principalmente para pessoas com deficiência. Por este motivo, a disponibilização de conteúdo didático digital como *e-books*, PDFs e materiais na Web tem ampliado o alcance ao conhecimento. Entretanto, algumas barreiras ainda persistem em relação ao acesso de pessoas com deficiência visual à informação. Mesmo com o avanço tecnológico e disponibilização de diversos materiais em vias digitais com possibilidade de leitura por leitores de tela, conteúdos específicos como a matemática ainda são causa de problema para usuários destes sistemas. Devido à complexidade das notações matemáticas e sua natureza abstrata, a matemática é uma ciência que apresenta desafios para compreensão por meios que não sejam visuais. Sendo assim, a leitura de conteúdo matemático por meio de leitores de tela atualmente enfrenta problemas como ambiguidade, compreensão de fórmulas longas e identificação de elementos específicos. Além disso, ainda que com problemas de leitura, poucos são os leitores de tela que oferecem suporte à leitura deste tipo de conteúdo. No caso da língua Portuguesa, a situação ainda é mais grave, com nenhum suporte atualmente para leitura de fórmulas matemáticas nos leitores de tela comerciais e livres de ampla utilização. A compreensão da leitura de fórmulas por meio de síntese de voz ainda apresenta desafios pela falta de possibilidade de obter visão geral sobre os conteúdos e pela limitação da natureza sequencial da síntese de voz. Desta forma, este trabalho se propôs a implementar e avaliar um *plugin* para leitura e exploração de fórmulas matemáticas de modo a possibilitar que o leitor de telas NVDA fosse capaz de explorar internamente as fórmulas utilizando delimitações contextuais nos elementos matemáticos com leitura em Português. Para isso, este trabalho se apoiou em resultados de trabalhos anteriores que tiveram a participação do autor desta dissertação, que envolveram: entrevistas com 12 pessoas com deficiência visual, além da realização de testes sobre um protótipo baseado no leitor de telas ChromeVox, que contou com a participação de 5 pessoas com deficiência visual. A partir da identificação das necessidades dos usuários, por intermédio das entrevistas e testes utilizando o protótipo ChromeVox-NavMatBR, foram identificados problemas envolvendo sobrecarga de memória e compreensão ambígua das fórmulas matemáticas. Tendo em mente estes problemas, o *plugin* com narração em português do Brasil aqui apresentado, denominado Access8Math-NavMatBR, baseado no Access8Math, foi desenvolvido e submetido a testes de usabilidade com a participação de 6 usuários com deficiência visual. O resultado desses testes demonstraram uma melhora quanto à compreensão das fórmulas, bem como a melhoria no acesso a elementos específicos com a exploração com abstração das fórmulas. O sistema demonstrou ser uma importante contribuição tecnológica, por tratar-se de um *plugin* com distribuição gratuita para uso. Como contribuição científica, o presente trabalho apresentou avanços no estudo de técnicas para auxiliar na compreensão das fórmulas matemáticas por pessoas com deficiência visual por meio de leitores de tela. Por tratar-se de um sistema de código aberto, o trabalho também possibilita sua utilização em pesquisas futuras. Este trabalho ainda traz como contribuições científicas um melhor entendimento a respeito das necessidades dos usuários de leitor de telas, bem como resultados de implicações de design de sistemas para leitura de fórmulas matemáticas no contexto brasileiro e considerações sobre os padrões de exploração utilizados por usuários brasileiros no que diz respeito à leitura e navegação em fórmulas matemáticas.

Palavras-chave: Deficiência visual. Software leitor de telas. Fórmulas Matemáticas. Estratégias de Navegação e Exploração. Usabilidade. Acessibilidade

ABSTRACT

The evolution of technological resources has expanded access to information for everyone, especially for people with disabilities. For this reason, the availability of digital teaching content such as e-books, PDFs, and Web content has broadened access to knowledge. However, some barriers persist concerning the access of people with visual disability to information. Even with technological advances and the availability of various materials in digital channels that can be read out by screen readers, specific contents such as mathematics are still a problem for users of these systems. Due to the complexity of mathematical notations and their abstract nature, mathematics is a science that presents challenges for understanding by means other than visual. Thus, reading mathematical content using screen readers currently faces problems such as ambiguity, helping to understand long formulas, and identifying specific elements. Besides, even with reading problems, few screen readers support reading this type of content. The situation is even more difficult considering screen-reader support for Portuguese reading, with a total absence of support in commercial and free widely-used screen readers. Understanding the reading of formulas through TTS systems still presents challenges. The lack of possibility of obtaining an overview of the contents and the limitation of the sequential nature of speech synthesis are problems that make understanding difficult. Thus, this study aimed to implement and evaluate a plugin for reading and to explore mathematical formulas with NVDA. This way, the plugin presented here offers the ability to internally explore the formulas using contextual delineations in mathematical elements with support to the Brazilian variant of the Portuguese language. For this, this study was based on results of previous works that had the participation of the author of this dissertation, which involved: interviews with 12 people with visual disabilities, in addition to conducting tests on a prototype based on the ChromeVox screen reader, including the participation of five people with visual disability. From the identification of users' needs and through interviews and tests using the ChromeVox-NavMatBR prototype, problems were identified involving memory overload and ambiguous understanding of mathematical formulas. Bearing these problems in mind, we present here a plugin with Brazilian Portuguese narration, called Access8Math-NavMatBR. This new plugin was based on the open-source Access8Math plugin. The version of the plugin was developed and evaluated in usability tests with the participation of six people with visual disabilities. Tests with the new system demonstrated an improvement in the understanding of formulas and an improvement in access to specific elements with exploration with an abstraction of formulas. The system showed to be a crucial technological contribution, as it is a plugin with free distribution for use. As a scientific contribution, we present advances in the study of techniques to help the understanding of mathematical formulas by people with visual disability through screen readers. As it is an open-source system, the work also allows its use in future researches. This work also brings scientific contributions to a better understanding of the needs of screen reader users. Besides, it presents design implications for systems for reading mathematical formulas in the Brazilian context. This work also brings considerations on the exploitation patterns used by Brazilian users in regards to reading and browsing mathematical formulas.

Keywords: Visual disabilities. Screen Reader. Mathematical Formulas. Navigation and Exploration Strategies. Usability. Accessibility

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Exemplo de texto contendo cabeçalhos e parágrafos	21
Figura 2.2 – Representação do modelo de exploração linear	26
Figura 2.3 – Representação do modelo de exploração em árvore	28
Figura 2.4 – Representação do modelo de exploração contextual	32
Figura 3.1 – Construção da fórmula de Bhaskara utilizando notação MathML	43
Figura 4.1 – Quantificação dos dados a respeito da compreensão das fórmulas utilizando a primeira versão do ChromeVox-NavMatBR	57
Figura 4.2 – Quantificação dos dados a respeito dos problemas encontrados na utilização da primeira versão do ChromeVox-NavMatBR	58
Figura 4.3 – Fluxo de leitura utilizando a estratégia de exploração contextual no Access8Math-NavMatBR	63
Figura 4.4 – Exemplo de regras de leitura definidas no arquivo math.rule para o idioma Português	64
Figura 4.5 – Separação estrutural da regra de leitura da estrutura mfrac	64
Figura 4.6 – Mediana das dificuldades das fórmulas de acordo com a classificação dos participantes do teste	70
Figura 4.7 – Pontuação SUS de cada participante do teste	85
Figura 1 – Fluxo no desenvolvimento do Mapeamento Sistemático	100
Figura 2 – Passo-a-passo da execução da busca	103

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Estratégias utilizadas por deficientes visuais ao navegar na web	22
Tabela 2.2 – Principais atalhos utilizados por deficientes ao navegar na web	23
Tabela 2.3 – Principais estratégias utilizadas por deficientes ao navegar na web	23
Tabela 2.4 – Estratégia de exploração adotada por cada um dos trabalhos selecionados pelo Mapeamento Sistemático	26
Tabela 2.5 – Exemplos de teclas e funções propostos por Stevens, Edwards e Harling (1997)	33
Tabela 3.1 – Características dos participantes das entrevistas	39
Tabela 3.2 – Fórmulas utilizadas nos testes da primeira versão do ChromeVox-NavMatBR	40
Tabela 3.3 – Dados demográficos dos participantes dos testes da primeira versão do ChromeVox-NavMatBR	41
Tabela 3.4 – Classificação feita pelo protótipo de exploração matemática a respeito da complexidade dos elementos da estrutura matemática apresentada na Figura 3.1	44
Tabela 3.5 – Dados demográficos dos participantes do teste com o <i>addon</i> Access8Math-NavMatBR	45
Tabela 3.6 – Perguntas aplicadas sobre as fórmulas utilizadas nos testes de usabilidade sobre o <i>addon</i> Access8Math-NatMatBR	47
Tabela 4.1 – Compreensão dos usuários sobre as tarefas apresentadas utilizando a primeira versão do ChromeVox-NavMatBR	56
Tabela 4.2 – Conjunto de funcionalidades que deverão estar presentes na nova versão do ChromeVox-NavMatBR contendo a exploração por elementos estruturais. .	61
Tabela 4.3 – Fluxo de leitura utilizando a estratégia de exploração por elementos estruturais da nova versão do ChromeVox-NavMatBR	63
Tabela 4.4 – Explicação dos trechos da linha de definição de regras de leitura	65
Tabela 4.5 – Compreensão dos usuários sobre as tarefas apresentadas utilizando o Access8Math-NavMatBR	70
Tabela 4.6 – Relação das categorias dos problemas sobre Interação com a Fórmula por quantidade de ocorrências	72
Tabela 4.7 – Relação das categorias das considerações sobre a Narração da Fórmula por quantidade de ocorrências	76

Tabela 4.8 – Mediana das respostas das perguntas gerais sobre a compreensão das fórmulas	82
Tabela 4.9 – Mediana das respostas do questionário SUS	85
Tabela 1 – Composição da string de busca	102
Tabela 2 – Lista de critérios de inclusão e exclusão usados na filtragem de documentos para esse mapeamento sistemático	102

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Problema e Objetivo	14
1.2	Estrutura da dissertação	18
2	REFERENCIAL TEÓRICO	19
2.1	Tecnologia Assistiva	19
2.2	Estratégias de navegação em conteúdo Web	20
2.3	Estratégias de exploração de conteúdo matemático	24
2.3.1	Exploração linear	25
2.3.2	Exploração em Árvore	27
2.3.3	Exploração Contextual	31
3	METODOLOGIA	36
3.1	Desenho do estudo	36
3.2	Entrevistas com pessoas com deficiência visual	37
3.2.1	Análise de dados das entrevistas	38
3.3	Testes de Usabilidade da Primeira Versão do ChromeVox-NavMatBR	40
3.4	Implementação do protótipo Access8Math-NavMatBR com recursos de exploração utilizando o NVDA	42
3.5	Testes de Usabilidade do Access8Math-NavMatBR com Exploração Contextual	44
3.5.1	Participantes	45
3.5.2	Tarefas	46
3.5.3	Aplicação dos testes	46
3.5.4	Análise de Dados	48
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
4.1	Análise de dados coletados em entrevista	49
4.1.1	Participantes	49
4.1.2	O uso de leitor de telas e dispositivos de interação	50
4.1.3	Vivência de aprendizado de Matemática na escola por pessoas com deficiência visual	50
4.1.4	Dificuldades com conteúdo matemático	50

4.1.5	Abordagens e recursos utilizados para o ensino e aprendizagem de matemática	51
4.1.6	Sugestões para interação com leitura de fórmulas	52
4.2	Análise de dados e implicações sobre a proposta de exploração de fórmulas matemáticas	53
4.3	Análise dos testes envolvendo estratégia de exploração de fórmulas matemáticas - ChromeVox-NavMatBR	55
4.3.1	Compreensão das tarefas	55
4.3.2	Análise de usabilidade	57
4.3.2.1	Problemas relacionados à interação	58
4.3.2.2	Problemas relacionados à compreensão do conteúdo lido	59
4.4	Implementação do Access8Math-NavMatBR com estratégia de exploração contextual em fórmulas matemáticas	60
4.5	Avaliação dos testes de interação e compreensão das fórmulas utilizando o <i>plugin</i> Access8Math-NavMatBR	68
4.6	Avaliação de usabilidade do Access8Math-NavMatBR	71
4.6.1	Interação com Fórmulas	71
4.6.1.1	Dificuldade para acionar o modelo de expansão em fórmula reduzida . . .	72
4.6.1.2	Dificuldade para compreender que um elemento complexo pode ter outros elementos complexos dentro	72
4.6.1.3	Funcionamento das teclas de atalho para exploração não é claro	73
4.6.1.4	Dificuldade para compreender a abstração da fórmula em componentes mais gerais	73
4.6.1.5	Dificuldade para compreender como aumentar ou diminuir o nível de abstração (zoom)	73
4.6.1.6	Dificuldade para identificar atributo de elemento de raiz	74
4.6.1.7	Dificuldade para identificar elemento específico na descrição detalhada de elemento dentro de fração	74
4.6.1.8	Dificuldade para sair da leitura de expansão de trecho de fórmula	74
4.6.1.9	Sistema não permite personalizar as teclas para exploração contextual . .	74
4.6.1.10	Usuário não compreendeu que poderia explorar o conteúdo do elemento abstrato “fração”	75

4.6.1.11	Usuário não compreendeu que poderia explorar o conteúdo do elemento abstrato “raiz”	75
4.6.1.12	Dificuldade para entender qual é o nível de abstração atual (zoom)	75
4.6.2	Narração de Fórmulas	75
4.6.2.1	Dificuldade para compreender narração de índice de raiz	75
4.6.2.2	Leitura de lista de elementos com enumeração pode confundir usuários . .	76
4.6.2.3	Leitura do numerador e denominador de fração sem pausa entre os dois dificulta o entendimento	77
4.6.2.4	Narração de raiz é confusa para o usuário	77
4.6.2.5	Narração de um elemento por vez leva usuário a crer que não há mais elementos	77
4.6.2.6	Dificuldade para compreender “negativo” como “sinal de menos”	77
4.6.2.7	Dificuldade para compreender estrutura de fração pela leitura	77
4.6.2.8	Dificuldade para compreender leitura de expoente em exponenciação . . .	78
4.6.2.9	Dificuldade para compreender narração devido a diferentes padrões utilizados pelos professores	78
4.6.2.10	Inconsistência na leitura e anúncio de entrada no interior de elementos . .	78
4.6.2.11	Dificuldade em distinguir o que é divisão e o que é fração	78
4.6.2.12	Narração da fórmula foi difícil de compreender	78
4.6.2.13	Narração padrão é muito rápida	79
4.6.3	Plataforma	79
4.6.4	Considerações Gerais	79
4.6.5	Sugestões de melhorias	82
4.6.5.1	Dificuldade para acionar o modelo de expansão em fórmula reduzida . . .	82
4.6.5.2	Dificuldade para compreender narração de índice de raiz	83
4.6.5.3	Leitura de lista de elementos com enumeração pode confundir usuários . .	83
4.6.5.4	Leitura do numerador e denominador de fração sem pausa entre os dois dificulta o entendimento	84
4.6.5.5	Narração de um elemento por vez leva usuário a crer que não há mais elementos	84
4.7	Satisfação dos Usuários com o Access8Math-NavMatBR	84
4.8	Discussão e Implicações	86

5	CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS	90
	REFERÊNCIAS	93
	APENDICE A – Questionário SUS para avaliação da satisfação de uso da segunda versão do ChromeVox-NavMatBR	99
	APENDICE B – Mapeamento Sistemático - Análise de técnicas de navegação na literatura	100
.1	Protocolo utilizado	100
.1.1	Questões de pesquisa	100
.1.2	String de busca e Base de dados	101
.1.3	Critérios de inclusão e exclusão	102
.1.4	Execução do protocolo de busca e seleção de trabalhos	102

1 INTRODUÇÃO

Com o desenvolvimento e aprimoramento de recursos tecnológicos, o acesso à informação por pessoas com deficiência visual tornou-se mais difundido. Isso se dá, entre outros fatores, pela disponibilidade de um vasto conteúdo presente na internet sobre diversos assuntos. Esses recursos, quando adequados para uso por meio de tecnologias como os leitores de tela, dão aos seus usuários a capacidade de acessar a informação presente nos meios eletrônicos.

Atualmente, existe um vasto leque de opções de leitores de telas e sistemas específicos para uso por pessoas com deficiência visual para as mais variadas áreas. Dentre estes é possível citar os leitores NVDA¹ (*NonVisual Desktop Access*), JAWS² (*Job Access With Speech*) e ChromeVox³ (leitor padrão do Chrome OS e disponível como plugin para o Google Chrome). Estes leitores são amplamente utilizados no mercado para as mais variadas funções, dentre as quais podemos citar a educação.

O estudo de conteúdos básicos na área de Matemática é extremamente importante para qualquer pessoa, independente da área de atuação. De modo especial, para carreiras voltadas às ciências exatas, a compreensão de conteúdo matemático é fator fundamental para a independência na busca por conhecimento. Para usuários cegos, o conhecimento matemático proporciona não somente ampliação de possibilidades educacionais, mas também uma maior autonomia pessoal, uma vez que a matemática está inserida no contexto diário de todo ser humano. Dessa forma, o acesso a matemática é de suma importância para qualquer indivíduo, e não deveria se limitar a questões como a condição física de qualquer que seja a pessoa. Isto é reforçado, ainda, pelo amparo legal existente no Brasil neste quesito. A Lei federal 13.146/2015 pontua, dentre outros aspectos, o direito da pessoa com deficiência ao acesso à educação, e conseqüentemente ao aprendizado e utilização da matemática.

1.1 Problema e Objetivo

A matemática possui em seu escopo inúmeras notações, formas de leitura e significados representativos para as mais variadas áreas de estudo da mesma. Devido a isso, a compreensão de conteúdos matemáticos não se faz simplesmente por meio de uma análise nos seus elementos separadamente, mas apoiando-se também em uma leitura de mais alto nível, para que por meio

¹ Disponível em <http://www.nvaccess.com>

² Disponível em <https://www.freedomscientific.com/JAWS>

³ Disponível em <http://www.chromevox.com/>

desta seja possível identificar a contextualização de cada elemento e enfim conferir a este um significado dentro do escopo estudado. Todo este processo neuro-visual, ainda que possa ser difícil, é feito de forma automática ao ler uma fórmula matemática por meio da visão. Isto ocorre devido à possibilidade de utilização da macro visão do conteúdo da fórmula. Porém, para uma pessoa com deficiência visual este processo torna-se algo mais complicado.

Os leitores de tela fazem a leitura por meio de voz, que naturalmente precisa ser transmitida de forma linear e sequencial, sem possibilidade de obtenção de uma visão geral, como por meios visuais. Devido à atual fragilidade dos modelos e recursos de Tecnologia Assistiva, os usuários acabam não tendo condições tão favoráveis para a realização da visão geral da fórmula, sendo obrigados a recorrer à memorização do conteúdo com a leitura linear e sequencial. Para obter um efeito de visão geral, similar ao obtido por pessoas sem deficiência visual, pessoas com deficiência visual precisam contar com recursos de navegação por teclado que se ancoram em elementos estruturais de conteúdos digitais para navegar pelas diferentes partes do conteúdo. Isso pode ser feito em páginas Web com elementos como cabeçalhos, listas, parágrafos, dentre outros utilizados na navegação em um *site*.

Atualmente, as páginas Web são desenvolvidas por meio de marcações propostas por elementos em HTML (*HyperText Markup Language*) (EICHOLZ et al., 2017), que seguem estruturas do XML (*eXtended Markup Language*) (BRAY et al., 2008). Outros tipos de conteúdo, tais como o conteúdo matemático são marcados por linguagens baseadas em XML como o MathML (*Mathematical Markup Language*) (MINER; ION; CARLISLE, 2014).

Para que o conteúdo Web possa ser acessado por pessoas com deficiência, é importante seguir padrões tais como as Diretrizes de Acessibilidade para o Conteúdo Web, denominado WCAG 2.0 (W3C Web Accessibility Initiative, 2008), que se consolidou como norma internacional denominada ISO/IEC 40500:2012 (ISO/IEC 40500:2012, 2012).

Este padrão fornece recomendações para desenvolvedores de conteúdo Web, visando a possibilidade de navegação do conteúdo por pessoas com deficiência. Porém, mesmo que as padronizações auxiliem em uma melhor navegabilidade em páginas Web existe ainda muito a ser estudado sobre estratégias de navegação, uma vez que não são muitos os trabalhos relacionados a estas técnicas (POWER et al., 2013; WATANABE, 2007; WATANABE, 2009). O número de estudos se reduz ainda mais quando o assunto é relacionado a exploração de fórmulas matemáticas.

No atual cenário, a literatura apresenta basicamente três formas de exploração de fórmulas matemáticas: exploração linear, em árvore e exploração contextual ou por abstração de conteúdo.

A exploração linear consiste em caminhar pela fórmula de forma linear e sequencial. Essa estratégia se caracteriza pela sua simplicidade, onde a fórmula é lida como um texto normal. Além disso, nesta abordagem o leitor de telas fornece ao usuário pouca ou nenhuma capacidade de interação com o conteúdo da fórmula (SORGE et al., 2014). Dentre as três estratégias, a mais utilizada é a exploração linear, utilizada em trabalhos como os apresentados por Ferreira e Freitas (2004a), Edwards, McCartney e Fogarolo (2006) e Bier e Sroczyński (2015).

Outra estratégia bastante utilizada é a exploração em árvore. O diferencial dessa forma de exploração encontra-se no fato de que o leitor de telas processa a fórmula como uma estrutura bem definida, separando os elementos da fórmula como nós e galhos de uma árvore. A partir desse processamento o leitor consegue fornecer ao usuário a possibilidade de interação com a fórmula de modo que o usuário seja capaz de caminhar sobre a estrutura montada. Esta estratégia é apresentada por Gaura (2002), Rahman (2005) e Soiffer (2015).

Por fim, a exploração contextual, proposta inicialmente por Stevens, Edwards e Harling (1997), utiliza do processamento estrutural da estratégia em árvore porém se esforça para abstrair o conceito de estrutura de árvore. Desse modo, a exploração contextual retira do usuário a necessidade de conhecimento prévio sobre o funcionamento da estrutura de dados em árvore para conseguir utilizar dessa estratégia. Para isso, os elementos da fórmula não são apresentados como nós de uma árvore, mas, a partir de um processamento prévio, recebem o seu real significado matemático dentro da fórmula como fração, somatório, raiz e etc. A apresentação semântica dos elementos matemáticos auxiliam na compreensão da fórmula, como apresentam Stevens, Edwards e Harling (1997). Apesar disso não existem muitos estudos que utilizem dessa estratégia. Por muitos anos não houveram investigações a respeito da forma de exploração proposta por Stevens, Edwards e Harling (1997). Entretanto, alguns estudos mais recentes voltaram a direcionar seus esforços para essa estratégia, tais como Fajardo-Flores e Archambault (2014), Soiffer (2015), Cervone, Krautzberger e Sorge (2016) e Gulley et al. (2017).

Ainda que os avanços alcançados por propostas para leitura de fórmulas matemáticas, poucos são os estudos sobre técnicas de exploração de fórmulas na Web. Além disso, o conhecimento sobre exploração de fórmulas matemática, de forma específica, nos mesmos moldes das técnicas de navegação Web de conteúdo geral é bastante escasso. A escassez dos estu-

dos se torna ainda maior quando a busca por estudos envolve questões específicas do contexto brasileiro, como o idioma, forma de utilização de leitor de telas e estratégias de navegação empregadas por brasileiros. Conforme é demonstrado na Seção 2.2, analisando os resultados das pesquisas feitas por W3C (2012) e Everis Brasil (2018) em comparação à realizada por WebAIM (2017), a estratégia utilizada na navegação é diferente entre a média mundial e a brasileira, o que demonstra a necessidade de enfoque nas questões particulares envolvendo a utilização de leitores de tela no cenário brasileiro. Aliado a isso encontra-se o fato de atualmente não existirem tecnologias satisfatórias de leitura de tela para conteúdo matemático em português utilizando técnicas mais avançadas como a exploração contextual.

Sendo assim, a proposta deste trabalho consistiu na elaboração de uma estratégia para exploração de fórmulas matemáticas na Web para pessoas com deficiência visual que utilizam leitores de tela. A estratégia elaborada será apresentada integralmente no Capítulo 4.4.

Para que este objetivo pudesse ser alcançado, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

1. Análise de entrevistas com pessoas com deficiência visual realizadas em estudo anterior para o levantamento de pontos críticos no aprendizado da matemática;
2. Análise de testes de usabilidade e compilação de implicações para design sobre de um estudo anterior com um protótipo do ChromeVox-NavMatBR, já desenvolvida no âmbito do projeto em que esta pesquisa se encontra (SILVA et al., 2018);
3. Realização de testes no protótipo ChromeVox-NavMatBR com usuários em potencial (ABREU et al., 2019) afim de levantar possíveis pontos de melhoria a serem abordados no novo *plugin* de exploração desenvolvido;
4. Implementação da estratégia de exploração contextual com leitura em Português do Brasil para fórmulas matemáticas no leitor de telas NVDA;
5. Realização de testes preliminares com usuários com deficiência visual para avaliar a estratégia proposta e implementada no Access8Math-NavMatBR e levantar possíveis pontos de melhoria e implicações para design.

1.2 Estrutura da dissertação

O restante do trabalho está disposto da seguinte forma. No Capítulo 2 são apresentados conceitos relacionados à pesquisa, abordando Tecnologia Assistiva, Estratégias de navegação em conteúdo Web, Estratégias de exploração de conteúdo matemático, Tecnologias para interação com conteúdo matemático e trabalhos relacionados sobre Leitura de conteúdo matemático na Web. O Capítulo 3 apresenta os procedimentos metodológicos utilizados. O Capítulo 4 contém os resultados obtidos pelo estudo aqui apresentado, bem como algumas discussões a respeito do que foi alcançado. Por fim, no Capítulo 5 são feitas as considerações finais.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo são apresentados conceitos importantes para a compreensão da proposta, além da discussão de trabalhos relacionados.

O restante deste capítulo está dividido da seguinte forma: na Seção 2.1 são abordadas questões referentes a Tecnologia Assistiva e seu uso por pessoas com deficiência. A seguir, na Seção 2.2 são apresentadas algumas das principais estratégias de navegação Web utilizadas por leitor de tela. Em seguida, na Seção 2.3 é exposto o estado da arte no que diz respeito às estratégias de exploração, bem como as tecnologias de interação com conteúdo matemático de modo geral.

2.1 Tecnologia Assistiva

De acordo com relatório publicado pela Organização Mundial de Saúde (OMS, 2011), cerca de 14% da população mundial é de pessoas com algum tipo de deficiência. No Brasil, segundo dados do IBGE (2010) o percentual de pessoas com deficiência chega a aproximadamente 24%.

Cook e Polgar (2014) afirmam que a deficiência é um fenômeno de construção social resultante de barreiras presentes no ambiente. Essas barreiras, em diversos níveis, causam impacto no cotidiano de pessoas com deficiência. Como uma forma de mitigar as dificuldades proporcionadas por essas barreiras, surgem as Tecnologias Assistivas (TA). De acordo com o Comitê de Ajudas Técnicas (CAT) (Comitê de Ajudas Técnicas, 2009):

Tecnologia Assistiva é uma área do conhecimento, de característica interdisciplinar, que engloba produtos, recursos, metodologias, estratégias, práticas e serviços que objetivam promover a funcionalidade, relacionada à atividade e participação, de pessoas com deficiência, incapacidades ou mobilidade reduzida, visando sua autonomia, independência, qualidade de vida e inclusão social

Segundo Cook e Polgar (2014), recursos de Tecnologia Assistiva oferecem a oportunidade necessária para reduzir a influência incapacitante que o ambiente exerce sobre a pessoa com deficiência. O Conselho Nacional sobre Deficiência do Governo dos Estados Unidos (1993) ainda destaca:

Para as pessoas sem deficiência, a tecnologia torna as coisas mais fáceis. Para as pessoas com deficiência, a tecnologia torna as coisas possíveis.

Como exemplo da afirmação do Conselho Nacional sobre Deficiência do Governo dos Estados Unidos (1993), pode-se observar, como um caso análogo, a criação e uso do Braille, que torna possível a comunicação escrita para pessoas com deficiência visual.

Deste modo, é possível compreender o fim principal dos recursos de Tecnologia Assistiva: impulsionar e proporcionar uma maior independência às pessoas com deficiência.

2.2 Estratégias de navegação em conteúdo Web

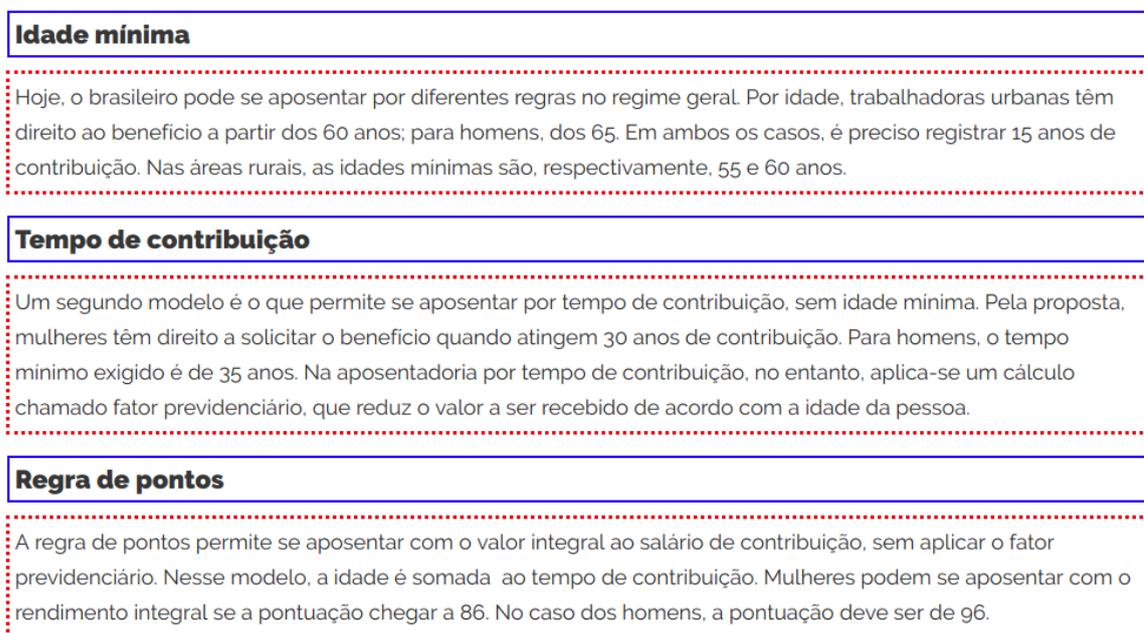
Segundo Borodin et al. (2010), a navegação na Web por pessoas com deficiência visual pode se tornar um grande desafio, e ainda causar frustração devido a possíveis problemas de acessibilidade e usabilidade. Moreno et al. (2018) citam que mesmo com a criação de diretrizes como o WCAG 2.0, grande parte dos obstáculos enfrentados por pessoas com deficiência não são cobertos por essas diretrizes. Ferri e Favalli (2018) afirmam em seu estudo que o avanço da tecnologia, ainda que trazendo diversas mudanças positivas em alguns cenários ainda é causa de exclusão e não inclusão, como era esperado.

Tendo em vista todos estes desafios, trabalhos como de Borodin et al. (2010), Power et al. (2013) e Sahib, Tombros e Stockman (2012) abordam estudos a respeito de estratégias utilizadas por pessoas com deficiência, de modo especial pessoas com deficiência visual, para contornar as barreiras encontradas na acessibilidade de sistemas Web.

Borodin et al. (2010) apresentam uma estratégia bastante utilizada por usuários com deficiência visual: a criação de um mapeamento do *site* acessado. Segundo os autores, ao se deparar com *sites* desconhecidos, é comum para usuários com deficiência visual navegar por todo o *site* para ser capaz de memorizar e se localizar por meio do mapeamento de pontos importantes. Ainda segundo os autores, esta navegação comumente é feita através da navegação por cabeçalho, explorando por meio de teclas de atalho todos os cabeçalhos presentes em uma página, sem ter que explorar o restante do conteúdo em um primeiro momento, de forma a ter uma visão geral. A Figura 2.1 apresenta um exemplo de como seria feita a navegação por cabeçalhos. Utilizando essa estratégia de navegação apenas os cabeçalhos (seções com bordas em linha azul) seriam lidos, já os parágrafos (seções com bordas pontilhadas em vermelho) seriam ignorados pelo leitor de telas.

Power et al. (2013) corroboram com a afirmação de Borodin et al. (2010), explicando que as estratégias mais utilizadas por usuários com deficiência visual são as que abordam formas de navegação e descoberta. Em seu estudo, Power et al. (2013) relatam que a descoberta

Figura 2.1 – Exemplo de texto contendo cabeçalhos e parágrafos



Fonte: Do autor (2020)

consiste na construção do mapeamento mental do *site* em si, enquanto a navegação baseia-se na utilização de esquemas de mapeamento previamente providos pelo próprio *site*, como mapas estruturais e menus de navegação.

Outra estratégia utilizada, segundo Borodin et al. (2010), é evitar conteúdos irrelevantes como anúncios ou menus. Fazendo isto, os usuários, segundo os autores, podem focar apenas naquilo que é relevante: o conteúdo principal do *site*. Esta forma de navegação vem acompanhada da utilização de recursos providos pelos leitores de tela, como o salto para o próximo cabeçalho ou o avanço para o conteúdo mais próximo que não seja um link (fornecido por leitores de tela como JAWS). A afirmação de Borodin et al. (2010) é reforçada pelos dados obtidos por Power et al. (2013), no qual os autores constatam que a navegação por cabeçalhos está entre as estratégias mais utilizadas. É importante ressaltar que, apesar de Borodin et al. (2010) afirmar que uma estratégia é a utilização de saltos para evitar menus e Power et al. (2013) apresentem como forma de navegação a utilização de menus como mapa para o site, por se tratarem de estratégias diferentes as duas alegações não se contradizem.

Outro trabalho que corrobora com essas informações é um levantamento desenvolvido por WebAIM (2017), com a participação de mais de 1.600 pessoas de todos os continentes, mas com predominância de participantes da Europa e América do Norte contabilizando 23% e 60% respectivamente. Neste trabalho, é constatado que 67,5% dos participantes utilizam

a navegação em cabeçalho como principal estratégia de busca por conteúdo em um site. A navegação por cabeçalho consiste em saltar por cada elemento demarcado com tag HTML de cabeçalho (<H1>-<H6>). A Tabela 2.1 demonstra os dados obtidos com a pergunta feita sobre qual estratégia o entrevistado utilizava primeiramente ao realizar uma busca dentro de um site.

Tabela 2.1 – Estratégias utilizadas por deficientes visuais ao navegar na web

Estratégia	Quantidade
Navegar pelos cabeçalhos da página	67,5%
Usar ferramenta de pesquisa	14,4%
Percorrer a página	7,3%
Navegar pelos links da página	6,8%
Navegar pelas marcações/regiões da página	3,9%

Fonte: adaptado de WebAIM (2017)

Em 2012, porém, o W3C (2012) divulgou uma pesquisa feita com pessoas com qualquer tipo de deficiência e que contemplou todas as regiões do Brasil, porém com maior predominância das regiões sudeste e sul contabilizando 66% e 21% respectivamente. A pesquisa foi realizada na forma de formulário eletrônico disponível na Web onde as respostas eram dadas espontaneamente e podiam contemplar mais de uma resposta. Ao final da coleta de dados, o W3C (2012) obteve 157 participantes. Na Tabela 2.2 apresentam-se os dados para a pergunta sobre quais são os atalhos mais utilizados por pessoas com deficiência ao navegar na web. Como é possível verificar, os dados obtidos por WebAIM (2017) e W3C (2012) são bastante contrastantes e evidenciam tendências de uso diferentes entre os usuários brasileiros em comparação com os usuários dos demais países.

Outra pesquisa foi por realizada pela Everis Brasil (2018) e também buscava compreender como era feita a interação dos usuários com os leitores de tela ao manusear uma página Web. De acordo com Everis Brasil (2018), sua pesquisa teve forte embasamento na realizada pela WebAIM (2017). Ao que consta, a pesquisa de Everis Brasil (2018) foi disponibilizada em questionário online aplicado em todas as regiões do Brasil, de modo que suas questões e alternativas eram próximas ou iguais as fornecidas pela pesquisa apresentada por WebAIM (2017). Ao final da coleta de respostas, a Everis Brasil (2018) obteve um total de 312 participantes com maior predominância de participantes das regiões sudeste, nordeste e sul do país contabilizando 59,6%, 19,6% e 12,8% respectivamente. A Tabela 2.3 apresenta os dados obtidos por Everis Brasil (2018) de acordo com as respostas dos participantes sobre o questionamento da estratégia utilizada ao buscar informações em uma página. Como é possível verificar, utilizando o

Tabela 2.2 – Principais atalhos utilizados por deficientes ao navegar na web

Estratégia	Quantidade
Salto direto para o conteúdo principal	50%
Saltos por teclas de atalho (accesskey)	46%
Salto direto para o conteúdo principal	50%
Saltos por teclas de atalho (accesskey)	46%
Saltos para os títulos da página	46%
Saltos para objetos da página (títulos, imagens, tabelas, listas, itens de lista, comboboxes, textos etc)	45%
Saltos por pesquisa direta de palavras na página	38%
Saltos para o início e final da página	36%
Saltos utilizando page down e page up	25%
Salto por chaves de acesso em links e campos de edição	22%
Saltos por landmarks (pontos de referência)	18%
Salto para partes secundárias fora do conteúdo principal	14%
Outra forma de salto	8%

Fonte: adaptado de W3C (2012)

mesmo formato de pesquisa, contendo as mesmas questões e alternativas de resposta, os dados obtidos por WebAIM (2017), em sua pesquisa global, apresentados na Tabela 2.1 diferem em proporções dos dados obtidos pela Everis Brasil (2018), em sua pesquisa realizada no Brasil, apresentados na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Principais estratégias utilizadas por deficientes ao navegar na web

Estratégia	Quantidade
Navegar pelos cabeçalhos da página	34,6%
Percorrer a página	27,6%
Navegar pelos links da página	26,6%
Usar ferramenta de pesquisa	10,9%
Navegar pelas marcações/regiões da página	0,3%

Fonte: adaptado de Everis Brasil (2018)

A diferença apresentada entre as duas pesquisas, bem como a diferença na comparação entre WebAIM (2017) e W3C (2012) podem justificar a necessidade da realização de um estudo voltado ao uso de leitores de tela por brasileiros, como é um dos pontos deste trabalho.

Uma outra estratégia levantada por Borodin et al. (2010) é a navegação por elementos específicos, como parágrafos por exemplo. Este tipo de navegação também costuma ser empregado pelos usuários a fim de saltar conteúdo irrelevante. Como os elementos HTML são de quantidade limitada, a utilização de uma estratégia como esta pode ser viável, ancorando-se em tipos de conteúdos. Entretanto, a utilização desse tipo de estratégia depende da proficiência

de pessoas com deficiência visual na utilização de diferentes teclas de atalho para navegar por tipos de conteúdo de acordo com a marcação.

A organização WebAIM (2017), conforme pode ser visto na Tabela 2.1, cita que outra técnica utilizada é a navegação por links nas páginas. Segundo a pesquisa, a utilização desta técnica é preferida por 6,8% dos usuários. A navegação por link consiste em navegar, ou ainda listar os elementos demarcados com *tag* de ancoragem HTML (<a>). Esta estratégia permite aos usuários ter uma percepção do *site* a ser navegado e saltar até aquilo que é relevante dentro da hierarquia de páginas e conteúdos.

De acordo com Borodin et al. (2010), mesmo havendo o conhecimento das estratégias citadas, e ainda tantas outras, a escolha de cada uma delas é algo totalmente pessoal e cada usuário tende a escolher aquela que melhor lhe atenda.

2.3 Estratégias de exploração de conteúdo matemático

O uso de recursos de Tecnologia Assistiva por pessoas com deficiência tem avançado de maneira significativa. Com este avanço, inúmeros recursos de TA foram criados, com os mais diferentes propósitos. Alguns trabalhos se direcionaram a criar ferramentas para a leitura de fórmulas matemáticas (STEVENS; EDWARDS; HARLING, 1997; SORGE et al., 2014; SOIFFER, 2015; DOUSH; PONTELLI, 2009; SOIFFER, 2005; SOIFFER, 2007; FRANKEL; BROWNSTEIN; SOIFFER, 2014; SALAMONCZYK; BRZOSTEK-PAWLOWSKA, 2015; CERVONE; KRAUTZBERGER; SORGE, 2016; BOONPRAKONG et al., 2017; MAĆKOWSKI et al., 2018), outros ainda se dedicaram a criar ferramentas que possibilitassem não só a leitura mas também a edição das fórmulas (GAURA, 2002; EDWARDS; MCCARTNEY; FOGAROLO, 2006; GRUBER et al., 2016; BIER; SROCZYŃSKI, 2015; ELKABANI; ZANTOUT, 2015; RAHMAN, 2005; MATOUŠEK et al., 2011; FAJARDO-FLORES; ARCHAMBAULT, 2014; FERREIRA; FREITAS, 2005; GULLEY et al., 2017). Existem ainda algumas ferramentas que trazem a possibilidade de geração de fórmulas matemáticas em \LaTeX contendo recursos de acessibilidade (BIER; SROCZYŃSKI, 2015; AHMETOVIC et al., 2020). Alguns são capazes de converter imagens de fórmulas matemáticas em outros formatos mais acessíveis como \LaTeX e MathML (SUZUKI et al., 2004) ou ainda deram foco a formatos utilizados em *e-books* como EPUB3 (BRZOSTEK-PAWLOWSKA; RUBIN; SALAMONCZYK, 2019; YAMAGUCHI; SUZUKI; KANAHORI, 2014).

Quando se trata da leitura de fórmulas matemáticas, além dos leitores de tela (EDWARDS, 1989), é possível citar também as linhas braille, por exemplo, com antigo histórico de utilização (SUTHERLAND, 1972). Todavia, a matemática é uma linguagem com muita comunicação escrita visual, com uso frequente de notações complexas e de sentidos variados. Por essa razão, o conteúdo matemático apresenta desafios para transmissão por outros meios que não sejam visuais (STEVENS; EDWARDS; HARLING, 1997).

De modo específico, a literatura apresenta atualmente 3 estratégias principais de exploração de fórmulas matemáticas: exploração linear, exploração em árvore e exploração por contexto ou por abstração de conteúdo complexo.

A Tabela 2.4 apresenta alguns trabalhos que foram obtidos a partir do mapeamento sistemático realizado no âmbito deste trabalho e descrito no Apêndice B. Na tabela destaca-se qual a estratégia utilizada por cada um dos trabalhos no que diz respeito a exploração de fórmulas matemáticas. Analisando a tabela é possível verificar que a linear é a estratégia mais utilizada, seguida pela exploração em árvore e por último a estratégia contextual. A estratégia menos utilizada e talvez a mais difícil de ser implementada, devido a necessidade de aplicar uma análise na fórmula a fim de identificar agrupamentos semânticos, é a exploração contextual. Apesar disso, conforme é possível verificar na tabela, nos últimos anos tem surgido alguns trabalhos que se baseiam na exploração contextual (FAJARDO-FLORES; ARCHAMBAULT, 2014; SOIFFER, 2015; CERVONE; KRAUTZBERGER; SORGE, 2016; GULLEY et al., 2017), proposta inicialmente por Stevens, Edwards e Harling (1997).

Nas seções seguintes cada uma das estratégias de exploração são apresentadas em mais detalhes, bem como exemplificadas através de estudos anteriores que as utilizaram.

2.3.1 Exploração linear

A exploração linear é a estratégia mais simples. Nela o usuário é conduzido a leitura da fórmula de forma sequencial e linear. Sua simplicidade encontra-se no fato de não ser abordado nenhum tratamento estrutural sobre o conteúdo. Sobre essa estratégia Sorge et al. (2014) relata de sua inaptidão em permitir ao usuário uma maior capacidade de compreensão e exploração do conteúdo, devido sua limitação quanto a interação. A Figura 2.2 apresenta a forma com que a leitura linear ocorre. No exemplo apresentado na Figura 2.2, uma possível leitura a ser feita por meio da exploração linear seria: "*raiz quadrada de três xis menos um dividido por dois mais abre parêntese um mais xis fecha parêntese ao quadrado*". Note que, de modo geral, o modelo

Tabela 2.4 – Estratégia de exploração adotada por cada um dos trabalhos selecionados pelo Mapeamento Sistemático

Trabalho	Linear	Árvore	Contextual
Stevens, Edwards e Harling (1997)			x
Gaura (2002)		x	
Ferreira e Freitas (2004a)	x		
Ferreira e Freitas (2004b)	x		
Ferreira e Freitas (2005)	x		
Rahman (2005)		x	
Soiffer (2005)	x		
Edwards, McCartney e Fogarolo (2006)	x		
Soiffer (2007)	x		
Wongkia, Naruedomkul e Cercone (2009)	x		
Doush e Pontelli (2009)	x	x	
Matoušek et al. (2011)	x		
Wongkia, Naruedomkul e Cercone (2012)	x		
Fajardo-Flores e Archambault (2014)			x
Frankel, Brownstein e Soiffer (2014)	x		
Sorge et al. (2014)		x	
Salamonczyk e Brzostek-Pawlowska (2015)	x		
Bier e Sroczyński (2015)	x		
Soiffer (2015)			x
Cervone, Krautzberger e Sorge (2016)			x
Gruber et al. (2016)	x		
Boonprakong et al. (2017)	x		
Gulley et al. (2017)			x
Silva et al. (2018)	x		
Mejía et al. (2018)	x		
Maćkowski et al. (2018)	x		
Manzoor et al. (2019)	x		

Fonte: Do autor (2020)

linear não permite muitas formas de interação entre o usuário e a fórmula e, por essa razão, a leitura quase sempre ocorre de modo direto e ininterrupto.

Figura 2.2 – Representação do modelo de exploração linear

$$\sqrt{\frac{3x-1}{2}} + (1+x)^2$$



Fonte: Do autor (2020)

Utilizando da estratégia de exploração e leitura linear, Edwards, McCartney e Fogarolo (2006) apresentaram seu projeto denominado Lambda. Neste projeto os autores desenvolveram um sistema que aliava síntese de voz e representação braille.

Conforme já mencionado, softwares de leitura linear geralmente oferecem poucos recursos voltados a exploração da fórmula matemática. A escassez destes recursos, ou ainda sua ausência total, é um dos grande fatores que fazem com que a compreensão de fórmulas matemáticas por meio deste método seja difícil. Segundo Rogers, Sharp e Preece (2013), a compreensão passa também pela capacidade de memorização. Tendo em mente este fato, é possível compreender claramente que a leitura linear exige do usuário a memorização de um conteúdo maior de dados. Isto se dá considerando que a informação é passada por completo, não havendo muitas vezes a possibilidade de recuar ou avançar partes da equação, ou ainda saltar para um trecho em específico do conteúdo da fórmula. O fato de o usuário ter que armazenar tamanho volume de informação compromete a compreensão da fórmula lida. Sendo assim, para que haja uma possível melhora no entendimento, é preciso que o usuário possa repetir a leitura inúmeras vezes. Esta repetição torna o sistema pouco efetivo ao usuário. Deste modo, a necessidade de repetição fere a usabilidade do mesmo, uma vez que um dos preceitos das heurísticas propostas por Nielsen é justamente a flexibilidade e eficiência do uso de um sistema. Talvez por este fato, dentre os usuários submetidos a utilização do Lambda não foi possível encontrar algum que tivesse como preferência a leitura do conteúdo apenas em modo *speech*, mas era unânime a preferência pela representação em Braille. De fato, a possibilidade de representar o conteúdo de modo tátil parece mais eficiente, uma vez que não existe ambiguidade sobre delimitações de escopo, precedências de operadores e outros pontos que geram várias dúvidas quando vistas através da leitura de tela. Porém, para utilização de técnicas de representação em Braille é necessária a utilização de dispositivos específicos como a linha braille. Artefatos de acessibilidade como estes são demasiadamente caros e, por isso, não são de fato acessíveis para todas as pessoas. Em contrapartida, os leitores de tela são sistemas mais fáceis de serem obtidos, tendo estes até mesmo versões gratuitas, como é o caso do NVDA no Windows, e o Orca¹ no Linux.

2.3.2 Exploração em Árvore

Na exploração em árvore o conteúdo matemático é tratado como uma estrutura de árvore onde cada elemento da equação é um nó. Um benefício alcançado por essa estratégia é a

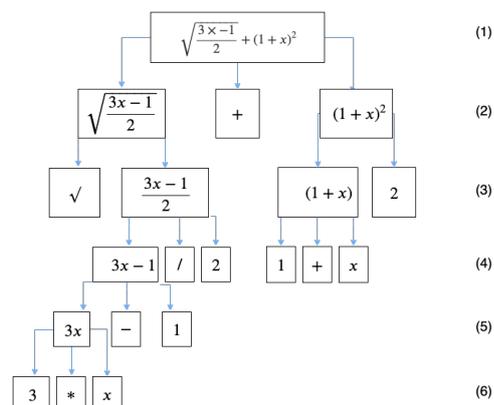
¹ Disponível em <http://live.gnome.org/Orca>

capacidade interativa do usuário quanto à fórmula. Isso é possível devido a estruturação da fórmula. Entretanto, de acordo com Stevens, Edwards e Harling (1997) e Sorge et al. (2014), a plena compreensão do funcionamento da estratégia é bastante atrelada ao entendimento da estrutura de dados em árvore em si. A Figura 2.3 trás uma possível representação em árvore da Fórmula 2.1, bem como suas possíveis granularidades. Nesse exemplo, ao navegar pela granularidade 1 o usuário teria como resultado a leitura linear da equação; passando para a granularidade 2 o usuário seria capaz de saltar entre a raiz quadrada, o sinal de + e $(1+x)^2$.

$$\sqrt{\frac{3x-1}{2}} + (1+x)^2 \quad (2.1)$$

Dando ao usuário a capacidade de interagir com as fórmulas, a estratégia de exploração em árvore foi utilizada por diversos autores, como é possível verificar na Tabela 2.4. Dentre os trabalhos que utilizam dessa abordagem, Raman (1994) foi um dos primeiros autores a criar um sistema de leitura e exploração envolvendo estrutura de árvore. Essa abordagem foi incorporada em um sistema de *text to speech* (TTS) denominado ASTER. Tal trabalho foi o precursor de muitos outros e ainda hoje exerce influência nos desenvolvimentos na área. Pode-se citar o fato de que o JAWS, um dos leitores de telas mais difundidos no cenário atual, utiliza da exploração em árvore para ler conteúdo matemático. Na abordagem proposta por Raman (1994), o usuário teria como capacidade de exploração as mesmas existentes nas estruturas de árvore:

Figura 2.3 – Representação do modelo de exploração em árvore



Fonte: Do autor (2020)

- Ir para o próximo elemento irmão;
- Voltar ao elemento irmão anterior;

- Ir para o elemento pai;
- Navegar até o elemento filho mais a esquerda;
- Navegar até o elemento filho mais a direita;
- Marcar o nó atual;
- Ir até o nó marcado.

Em comparação com tecnologias de leitura puramente lineares, a exploração em árvore ainda está um passo à frente. Isso se deve ao fato de que em uma leitura linear o usuário é obrigado a passar pela fórmula integralmente. Além disso, neste modo de exploração a interação do usuário com a fórmula matemática que está sendo lida se torna muito restrita, ou ainda nula.

Além do JAWS, seguindo a linha de exploração em árvore, há também sistemas especializados como o REMathEx (*Reader and Editor of the Mathematical Expressions*) proposto por Gaura (2002). Neste trabalho, Gaura (2002) afirma que a compreensão do funcionamento de uma estrutura de árvore é dispensável para que o usuário seja capaz de compreender a equação que está sendo lida. Porém, Stevens, Edwards e Harling (1997) contrapõe Gaura (2002) afirmando que para a manipulação de fórmulas matemáticas como estruturas em árvore é fundamental o conhecimento prévio sobre esta estrutura. Sorge et al. (2014) ainda reforçam que esta forma de exploração é uma abordagem inadequada para a transmissão da subestruturação de diversas expressões. É importante salientar que a afirmativa de Sorge et al. (2014) é formulada mediante estudos com usuários cegos no Google.

Apesar de afirmarem da necessidade de conhecimento prévio sobre a estrutura de árvore para a utilização dessa abordagem na navegação, Sorge et al. (2014) utilizam desse modelo de navegação. Em seu trabalho os autores propõem o desenvolvimento de um software que atua diretamente sobre o *browser* em que o conteúdo está aberto. Para tal, o mesmo desenvolve seu trabalho dando enfoque na utilização do leitor ChromeVox. Esta abordagem amplia a possibilidade de utilização uma vez que se estende a diversos tipos de conteúdos disponíveis na Web. Ao passo que também limita a leitura em certo aspecto, uma vez que para que a leitura seja realizada, é necessário que o conteúdo antes esteja disponível na Web e seja aberto no navegador em questão. Além do ChromeVox, outro leitor que utiliza a exploração em árvore é o JAWS, como dito anteriormente.

Silva et al. (2017) realizaram uma pesquisa a respeito dos principais leitores comerciais e seu comportamento quanto à exploração de fórmulas matemáticas. A pesquisa envolveu

os leitores ChromeVox, JAWS e uma versão do NVDA utilizando leitura linear. A pesquisa consistia na análise da execução de três tarefas sobre uma equação quadrática e seus respectivos esforços a nível de tempo. As tarefas eram situações bem simples. Dentre elas estava a verificação da existência de duas raízes reais idênticas, apuração da concavidade da parábola e análise sobre a completude da equação. Para a realização da verificação dos esforços, os autores utilizaram do modelo de tarefa GOMS (*Goals, Operators, Methods e Selections rules*) e KLM (*Keystroke-Level Model*). Desse modo, Silva et al. (2017) chegaram em valores que estimavam que a realização das três atividades utilizando os diferentes leitores levaria cerca de 203.28 segundos no NVDA, 153.56 segundos no ChromeVox e 132 segundos no JAWS.

O estudo caracterizou, assim, que possivelmente a navegabilidade proposta pelo JAWS é a que demanda menos esforço dentre as 3 analisadas. Porém, como não foram realizados testes empíricos com usuários e os modelos foram aplicados em poucos cenários, não é possível afirmar com total certeza tal fato.

Embasando-se na análise realizada por Silva et al. (2017), Silva et al. (2018) aprofundaram a pesquisa realizando ainda uma comparação com um protótipo de software baseado no ChromeVox. O protótipo em questão foi denominado ChromeVox-NavMatBR e apresentou propostas diferentes da exploração padrão do ChromeVox pela inclusão de comandos específicos sobre equações matemáticas. Dentre estes comandos estavam, entre outros:

- navegar para dentro da expressão à direita e à esquerda;
- navegar para a próxima fração;
- navegar para a fração anterior.

Para a realização das análises, Silva et al. (2018) propuseram um conjunto de três tarefas:

- verificação da ocorrência de um numerador em específico;
- verificar o limite superior do somatório;
- verificar o índice da segunda raiz de uma expressão.

Utilizando da aplicação do método GOMS e KLM, Silva et al. (2018) foi capaz de verificar novamente que dentre os leitores NVDA, JAWS e ChromeVox, o de menor esforço continuava sendo o JAWS. Porém, inserindo o protótipo ChromeVox-NavMatBR na análise de resultados, os autores puderam constatar que este demandava ainda menos esforço que o

JAWS para a realização das atividades. Os números obtidos por Silva et al. (2018) na pesquisa foram 414,36 para JAWS; 346,84 para ChromeVox; 305,27 para NVDA e 260,6 segundos para ChromeVox-NavMatBR. É válido ressaltar que a versão que, assim como Silva et al. (2017), Silva et al. (2018) usou uma versão do NVDA onde a estratégia de exploração utilizada era a leitura linear.

Assim como os resultados obtidos por Silva et al. (2017) não são capazes de nos apontar com total certeza qual a abordagem mais agradável e menos difícil para os usuários, as constatações feitas por Silva et al. (2018) também não o são, pelo mesmo fato já afirmado sobre a pesquisa anterior: pequena quantidade de análises teóricas e ausência de realização de testes empíricos. Porém, ainda assim os resultados de ambas pesquisas sugerem a possibilidade de otimização nos métodos de navegação por fórmulas matemáticas existentes na atualidade.

2.3.3 Exploração Contextual

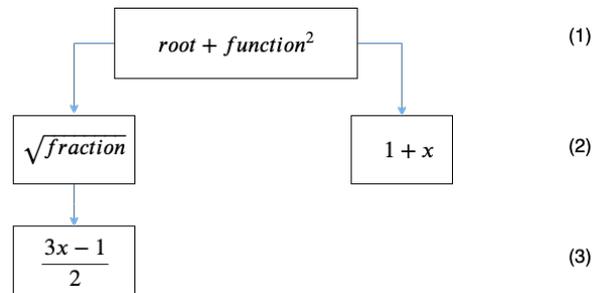
A estratégia de exploração contextual baseia-se fortemente na exploração em árvore. A diferença entre as duas abordagens reside no fato de que, diferentemente da navegação em árvore, na exploração contextual os elementos não são apresentados como nós de uma árvore. Para que os elementos matemáticos possam ser lidos e explorados, a fórmula passa por um agrupamento semântico, de modo a separar cada trecho da fórmula em contextos matemáticos. Isso é feito para que a navegação seja feita sobre os agrupamentos matemáticos, como frações e raízes, no lugar de serem feitas sobre os nós da árvore.

Conforme demonstra a Figura 2.4, a exploração contextual, utilizando o agrupamento semântico, possibilita a abstração de todas as informações momentaneamente desnecessárias à leitura, reduzindo a quantidade de informações passadas. Ao fazer isso, o usuário é capaz de ter uma visão geral da fórmula sem que haja a necessidade de fazer a leitura completa da mesma. Apesar de abstrair momentaneamente os detalhes da fórmula, a exploração contextual também permite ao usuário navegar internamente em cada um dos contextos matemáticos separadamente e, assim, realizar a leitura de seus detalhes.

A estratégia de exploração contextual foi desenvolvida por Stevens, Edwards e Harling (1997) tendo como base as fragilidades de compreensão estrutural evidenciada no modelo de exploração em árvore. Desse modo, Stevens, Edwards e Harling (1997) apresentou o Math-Talk. Utilizando da estratégia de exploração, o autor separa estruturalmente termos simples e complexos da fórmula. Os autores definem termos complexos como trechos com mais de um

termo envolvido, como uma fração por exemplo. Essa definição é importante para definir os agrupamentos e como realizar a leitura de cada um deles.

Figura 2.4 – Representação do modelo de exploração contextual



Fonte: Do autor (2020)

De acordo com a abordagem do MathTalk, a leitura é feita inicialmente de forma linear, em que cada termo simples é lido e os termos complexos são substituídos por um significado representativo. Sendo assim, ao se deparar com uma Fórmula 2.2 o conteúdo seria lido como "x é igual a uma fração". A leitura detalhada do conteúdo de "fração" pode ser detalhada por solicitação do usuário. Com a solicitação de detalhamento da função, o leitor de telas seria direcionado ao contexto da "fração" e a partir disso leria o conteúdo anteriormente abstraído. Além da abstração do conteúdo, a proposta visava tornar o usuário um agente ativo sobre a fórmula lida, melhorando a experiência do leitor quanto ao uso do sistema. Sendo assim, Stevens, Edwards e Harling (1997) propuseram um leque de comandos simples e genéricos que trabalham sobre a fórmula em seus variados contextos. Cada tecla de atalho possui uma função em específico e a união delas, segundo a proposta, seria capaz de gerar novos atalhos mais específicos. A Tabela 2.5 apresenta alguns exemplos de teclas e funcionalidades propostas por Stevens, Edwards e Harling (1997). Exemplificando a utilização das funcionalidades propostas, se o usuário estivesse dentro de uma fórmula e pretendesse ler o conteúdo da próxima expressão matemática utilizando o MathTalk bastaria pressionar as teclas: N E I S.

$$x = \frac{-b \pm \sqrt{\Delta}}{2a} \quad (2.2)$$

Desta forma, segundo os autores, a abordagem pode melhorar a experiência do leitor dando a ele poder de ação sobre o conteúdo. Com isso, a abstração de informações “desne-

Tabela 2.5 – Exemplos de teclas e funções propostos por Stevens, Edwards e Harling (1997)

Tecla	Função
Falar	S
Próximo	N
Anterior	P
Entrar	I
Sair	O
Expressão	E

Fonte: adaptado de Stevens, Edwards e Harling (1997)

cessárias” em um primeiro momento reduziria a ambiguidade na transmissão da informação presente na fórmula.

Ainda que a abordagem oferecida por Stevens, Edwards e Harling (1997) possa ser considerada relevante, alguns aspectos da matemática foram desconsiderados em seu desenvolvimento. Um destes aspectos é a variedade de significados assumidos pelas notações matemáticas de acordo com seu contexto. Analisando a pesquisa acerca do desenvolvimento do MathTalk, não é possível identificar questões de tratamento desses diversos tipos de significado de conteúdo.

Fajardo-Flores e Archambault (2014) também utilizaram na exploração contextual em seu estudo, onde realizaram a validação de um protótipo baseado nessa estratégia. A validação contou com a participação de quatro professores, entre eles: um cego, um com visão parcial e dois com visão. Todos eles tinham experiência no ensino de pessoas com deficiência. O método de avaliação utilizado pelos autores foi o protocolo *Cognitive Walkthroughs* (LEWIS; WHARTON, 1997). De modo geral, os professores analisaram positivamente a abordagem adotada pelos autores. Além disso, os professores participantes classificaram a visualização granular como um ponto útil da abordagem, como um meio de realizar a abstração da complexidade.

Soiffer (2015) apresenta dados sobre a nova versão do *plugin* MathPlayer (SOIFFER, 2005; SOIFFER, 2007). Na versão apresentada pelo autor (MathPlayer 4), o autor inclui como um dos objetivos do sistema um melhor reconhecimento de estruturas matemáticas para fornecer uma leitura mais semanticamente natural do conteúdo. Aliado a esta melhora do reconhecimento das estruturas matemáticas, o autor apresenta ainda a possibilidade de realizar a navegação utilizando a exploração contextual.

MathPlayer é um *plugin* desenvolvido inicialmente para atuar sobre o navegador Internet Explorer, realizando a leitura de fórmulas matemáticas em conjunto com o leitor de tela preferencial do usuário. A partir de sua versão número 4, o mesmo passou a prover também

interação com os programas Microsoft Office Word, Microsoft Office PowerPoint e Mozilla Firefox. Em suas versões iniciais (SOIFFER, 2005; SOIFFER, 2007) não apresentava estratégias de exploração estrutural, fornecendo ao usuário apenas a leitura linear. Entretanto, em versões mais recentes a navegação passou a ser disponibilizada utilizando a exploração contextual (SOIFFER, 2015). Todavia, ainda hoje o *plugin* não apresenta leitura em português. Ao ser executado conjuntamente ao NVDA, o leitor de telas realiza a leitura dos números em português e os demais elementos matemáticos são lidos em inglês (idioma padrão do *plugin*), o que é bastante prejudicial à compreensão da leitura. Além disso, apesar das evoluções apresentadas na última versão do MathPlayer, o autor não disponibilizou dados informativos a respeito de testes ou avaliações feitas sobre a ferramenta.

Cervone, Krautzberger e Sorge (2016) apresentaram um estudo desenvolvido no MathJax. A abordagem dos autores também permite a renderização de fórmulas matemáticas utilizando a abstração de conteúdo complexo e a exploração utilizando a estratégia contextual. Os autores, no entanto, não apresentaram nenhum teste ou avaliação que pudesse auxiliar na análise de sua proposta.

Gulley et al. (2017) propuseram um *framework* para ajudar os professores a interagir com os alunos no ensino de matemática. O *framework* proposto, no momento da publicação do artigo, seria ainda apenas uma ideia geral de como os alunos com deficiência visual e motora deveriam fazer a leitura de fórmulas matemáticas, tendo como base a exploração contextual. No cenário, a leitura teria um professor ou assistente como leitor. No entanto, os autores estavam trabalhando em uma implementação de software que utiliza os conceitos levantados de maneira automatizada, tornando desnecessária a necessidade de interação por meio da figura de um intermediador. De acordo com Gulley et al. (2017), o uso da abstração de complexidade na leitura provê uma redução na sobrecarga de memória. Essa informação é pertinente e reforça as ideias apresentadas por (RAMAN, 1994) e Fajardo-Flores e Archambault (2014). No entanto, nenhuma avaliação empírica foi realizada para comprovar a redução da sobrecarga de memória. Além disso, os autores utilizaram abstração mesmo em elementos simples como números e variáveis simples em uma equação. Essa abstração desnecessária pode tornar a exploração e a leitura da fórmula mais verbosas, aumentando o esforço do usuário em seu uso. É importante salientar que, no momento da escrita deste trabalho, não foi localizada qualquer publicação que remetesse a implementação do *framework* em questão.

Em suma, observa-se que os trabalhos relacionados, mesmo propondo metodologias inovadoras sobre a exploração de fórmulas matemáticas, como é o caso do recente trabalho de Silva et al. (2018) ou ainda do trabalho antigo mas de alta relevância proposto por Stevens, Edwards e Harling (1997), não foram capazes de sanar completamente problemas como a ambiguidade, manuseio de fórmulas longas e ainda do tratamento genérico das fórmulas para a navegação. É possível notar ainda que as estratégias de exploração em fórmulas matemáticas não possuem um desenvolvimento científico e tecnológico tão profundo quanto as aplicadas em páginas Web de modo geral.

3 METODOLOGIA

Este capítulo apresenta a metodologia utilizada para o desenvolvimento deste projeto de mestrado, com o desenho do estudo, estudos anteriores em andamento dos quais o autor da dissertação participou, envolvendo entrevistas com pessoas com deficiência visual e teste de usabilidade do protótipo ChromeVox-NavMatBR, seguido da implementação do protótipo Access8Math-NavMatBR, desenvolvido no contexto deste projeto de mestrado e os testes de usabilidade do Access8Math-NavMatBR.

3.1 Desenho do estudo

O presente projeto se dividiu em 7 etapas:

1. participação na realização de entrevistas com pessoas com deficiência visual lideradas por Anjos et al. (2020);
2. análise dos dados coletados nas entrevistas;
3. participação nos testes sobre o protótipo ChromeVox-NavMatBR elaborado por Silva et al. (2018) e Abreu et al. (2019);
4. implementação do protótipo Access8Math-NavMatBR contendo uma nova abordagem de exploração de fórmulas utilizando o leitor de telas NVDA com o *plugin* Access8Math (TSENG, 2018);
5. teste de usabilidade do protótipo Access8Math-NavMatBR com proposta de exploração de fórmulas e
6. análise de implicações de design.

A realização das entrevistas com usuários em potencial, bem como as análises dos dados coletados foi parte fundamental na compreensão dos problemas enfrentados por pessoas com deficiência visual e possibilitou a realização de um design centrado no usuário na elaboração do *plugin* Access8Math-NavMatBR.

A participação nos testes do *plugin* ChromeVox-NavMatBR permitiu ao pesquisador analisar problemas relacionados a esta abordagem e a partir disto, considerá-las na elaboração do Access8Math-NavMatBR.

Tendo como base as lacunas identificadas nas etapas anteriores, o *plugin* Access8Math-NavMatBR foi implementado visando sanar problemas como ambiguidade na leitura das fórmulas e possibilitar a exploração contextual de fórmulas e partes de fórmulas. Além disso, a implementação possibilitou um maior alcance de usuários para leitura em Português do Brasil como NVDA – o leitor de tela mais utilizado no Brasil (Everis Brasil, 2018) – algo até então não disponibilizado por nenhuma outra ferramenta com exploração contextual.

A partir da implementação do Access8Math-NavMatBR, os testes foram feitos para verificar se a solução proposta foi capaz de sanar os problemas de ambiguidade na leitura das fórmulas e sobrecarga de memória do usuário, além de levantar pontos de melhorias na estratégia de exploração e na forma com que os elementos são narrados, por exemplo.

É importante ressaltar que as atividades 1, 2 e 3 foram iniciadas antes do início deste projeto de mestrado. Entretanto, elas foram importantes para a identificação de requisitos e lacunas dentro do cenário de Leitores de Telas para leitura de fórmulas matemáticas.

O projeto foi analisado e aprovado pelos Comitês de Ética em Pesquisa com Seres Humanos das duas instituições envolvidas na pesquisa, com protocolo CAAE 65451917.8.1001.5148 na instituição sede (UFLA), e na Universidade Federal de Mato Grosso em Rondonópolis como participante, auxiliando na aplicação de entrevistas e na realização dos testes da versão ChromeVox-NavMatBR.

3.2 Entrevistas com pessoas com deficiência visual

A primeira etapa da presente pesquisa contou com um estudo envolvendo pessoas com deficiência visual, que teve como objetivo levantar as principais lacunas e experiência com leitura de fórmulas matemáticas, para auxiliar na definição de estratégias para leitura e exploração de fórmulas matemáticas por com deficiência visual com leitor de telas. As entrevistas abordaram experiências e dificuldades dos entrevistados à respeito da matemática num contexto educacional, bem como sugestões sobre melhorias através de tecnologias assistivas como leitores de tela. As entrevistas foram realizadas com participantes do projeto NavMatBR da Universidade Federal de Lavras e da Universidade Federal de Mato Grosso em Rondonópolis em parceria com o Centro de Reabilitação Louis Braille de Rondonópolis, com a participação do autor desta dissertação na análise dos dados após a coleta por bolsistas de iniciação científica do projeto. Os dados resultantes serviram de base para as propostas elaboradas nesta dissertação de mestrado.

Desta forma, o estudo para levantar as necessidades de pessoas com deficiência visual em relação ao uso de conteúdo com fórmulas matemáticas foi dividido em duas fases:

Fase 1) Coleta de dados envolvendo pessoas com deficiência visual.

Fase 2) Análise dos dados levantados a fim de identificar as principais necessidades dos usuários e possíveis problemas com os métodos atualmente empregados por recursos de Tecnologia Assistiva existentes.

Foi adotada a estratégia de entrevista semi-estruturada, devido à sua flexibilidade na obtenção de dados e possibilidade de aprofundamento em pontos importantes do trabalho que pudessem surgir durante a interação com os participantes.

A entrevista contou com doze participantes de idades entre 9 e 65 anos. Dentre os participantes, havia pessoas com cegueira congênita, cegueira não congênita, baixa visão congênita e catarata congênita. Quanto à escolaridade, participaram pessoas com ensino superior completo, ensino superior incompleto, ensino médio e fundamental completos, conforme é possível verificar na Tabela 3.1.

Na entrevista, foram feitas perguntas visando retratar as experiências dos participantes com ensino e estudo de conteúdos que envolvem fórmulas matemáticas.

As entrevistas foram precedidas da apresentação e assinatura de um termo de consentimento livre e esclarecido. No termo constava o projeto ao qual se destinavam as questões, o motivo da participação do entrevistado, entre outras informações relevantes. O termo também tratava sobre o sigilo da entrevista. Além disso, o entrevistado era instruído sobre sua liberdade de interrupção da entrevista, além de possibilidade de esclarecimento de dúvidas a qualquer momento.

3.2.1 Análise de dados das entrevistas

Os dados das entrevistas realizadas na Fase 1 foram analisados utilizando elementos da técnica de Análise Temática (BRAUN; CLARKE, 2006) de forma a identificar temas emergentes. Os temas identificados eram relacionados às experiências de ensino e aprendizagem envolvendo conteúdos com formulação matemática, uso de tecnologias, dificuldades e melhores práticas apontadas para o ensino de matemática.

Fizeram parte deste processo uma primeira codificação aberta, em que cada entrevista foi analisada separadamente a fim de levantar os principais pontos abordados, com a criação de

Tabela 3.1 – Características dos participantes das entrevistas

Código	Idade	Sexo	Estado	Deficiência	Escolaridade	Leitores de tela que já utilizou
D1	24	M	MG	Cego não congênito	Ensino superior cursando	VoiceOver (smartphone) e Dosvox
D2	65	M	MG	Cego não congênito	Ensino superior	NVDA, Jaws e ChromeVox
D3	52	F	MG	Cego congênito	Ensino superior	Dosvox, Virtual Vision, NVDA, Jaws e Voice Over
D4	24	M	MG	Baixa visão congênita	Ensino médio	NVDA
D5	30	M	MG	Baixa visão congênita	Ensino superior	NVDA, Jaws, Virtual Vision, Orca, TalkBack (smartphone) e VoiceOver
D6	9	M	MT	Baixa visão congênita	Ensino fundamental cursando	Não utiliza
D7	10	M	MT	Baixa visão congênita	Ensino fundamental cursando	Não utiliza
D8	15	F	MT	Baixa visão congênita	Ensino fundamental cursando	Não utiliza
D9	32	M	MT	Catarata congênita	Ensino médio	NVDA e Jaws
D10	20	F	MT	Cego congênito	Ensino médio	NVDA e Jaws
D11	34	F	MT	Baixa visão não congênita	Ensino superior cursando	NVDA e Jaws
D12	34	F	MT	Cego congênito	Ensino superior	NVDA e Jaws

Fonte: Do autor (2020)

categorias para as questões levantadas. A partir da codificação aberta, foi realizada a separação dos dados em categorias temáticas agrupando as categorias menores.

Uma vez consolidada a identificação de temas, as entrevistas foram revisadas e rotuladas de acordo com o tema proposto. Este processo possibilitou a identificação de padrões nos dados obtidos, que por sua vez possibilitaram o reconhecimento de limitações no modo com que os recursos de Tecnologia Assistiva atualmente proveem a transferência de informação aos usuários. Foram também identificados pontos de atenção quanto à experiência que os usuários

tem tido na utilização de recursos de Tecnologia Assistiva e suas interações para o aprendizado de matemática.

3.3 Testes de Usabilidade da Primeira Versão do ChromeVox-NavMatBR

O trabalho apresentado neste documento é a continuação de uma série de pesquisas no contexto do projeto NavMatBR. Esses trabalhos geraram, dentre outros resultados, a proposta de exploração matemática apresentada por Silva et al. (2018), bem como sua avaliação por meio da realização de uma série de testes e análises de implicações de design demonstrados por Abreu et al. (2019), com a participação do autor desta dissertação.

O software em questão, denominado ChromeVox-NavMatBR, foi desenvolvido pelo Núcleo de Pesquisas em Acessibilidade, Usabilidade e Linguística Computacional (ALCANCE). O Núcleo ALCANCE é um grupo de pesquisas do Departamento de Ciência da Computação (DCC) da Universidade Federal de Lavras (UFLA).

A abordagem proposta por Silva et al. (2018) caracterizou-se pela capacidade de navegar utilizando salto de estruturas pré-definidas: fração, somatório, raiz, numerador e denominador. A partir desta proposta, para a realização dos testes foram elaboradas 4 tarefas envolvendo a manipulação de expressões matemáticas. É importante salientar que as expressões foram definidas em conjunto com profissionais na área da Matemática, considerando diferentes graus de complexidade. A execução das tarefas consistia na leitura e na interpretação dos conteúdos matemáticos por meio do leitor ChromeVox-NavMatBR.

As fórmulas definidas por Abreu et al. (2019) para a execução dos testes foram sequenciadas pelo seu grau de complexidade. A Tabela 3.2 apresenta as fórmulas e sua ordem na aplicação dos testes.

Tabela 3.2 – Fórmulas utilizadas nos testes da primeira versão do ChromeVox-NavMatBR

Ordem de aplicação	Fórmula
1 ^a	$(3 - \frac{1}{2})$
2 ^a	$-2^3 \times (40 \div \frac{18}{\sqrt{36}}) \times (3 - \frac{1}{2})$
3 ^a	$\frac{32 + \sqrt[3]{\frac{128}{2}}}{8 + \sqrt{4}} - \pi$
4 ^a	$\frac{-4^6 \times (18 \div \frac{12}{\sqrt{25}}) \times (9 - \frac{1}{3})}{8^5 \times (\sqrt[4]{81} \div 3)}$

Fonte: adaptado de Abreu et al. (2019)

Para o recrutamento dos participantes, foram convidadas pessoas com deficiência visual, que tivessem ao menos iniciado seus estudos no Ensino Fundamental 2 (6º ao 9º ano) e que possuíssem ao menos experiência básica na utilização do computador.

A execução desta etapa do estudo contou com a aplicação de metodologias bem aceitas e difundidas na literatura. O método de avaliação utilizado com o usuário foi o de observação com o *think-aloud*. O método *think-aloud* (LEWIS, 1982) consiste em pedir que o usuário narre em voz alta aquilo que está pensando enquanto realiza uma tarefa. Ao fazer isso, o usuário permite ao condutor do experimento notar pontos que possam ser importantes em sua avaliação de usabilidade, como a dificuldade encontrada pelo usuário ao realizar uma tarefa ou sua compreensão errada sobre algum elemento do sistema.

Ao todo, os testes descritos por Abreu et al. (2019) envolveram 5 participantes. A Tabela 3.3 apresenta seus dados demográficos.

Tabela 3.3 – Dados demográficos dos participantes dos testes da primeira versão do ChromeVox-NavMatBR

Usuários	Idade	Escolaridade	Deficiência	Experiência com Leitor de telas
T1	24 anos	Ensino médio completo	Baixa visão	Básica
T2	24 anos	Superior em andamento	Cego	Iniciante
T3	32 anos	Superior completo	Baixa visão	Intermediário
T4	52 anos	Fundamental completo	Cego	Básico
T5	30 anos	Pós graduação em andamento	Cego	Avançada

Fonte: adaptado de Abreu et al. (2019)

As informações obtidas via *think-aloud* foram anotadas no decorrer dos testes para posterior análise.

Todos os testes foram gravados utilizando o software Morae¹ e uma *Webcam*. Por meio destes recursos, foi possível registrar tanto a tela do computador onde os testes eram conduzidos quanto a feição do participante que executava os comandos.

A análise dos testes consistiu na observação das filmagens e das anotações tomadas no decorrer da aplicação dos testes. A partir disso foram observados problemas de usabilidade e apontamentos de questões que prejudicavam ou auxiliavam nos testes. Tais problemas e apon-

¹ Disponível em <https://www.techsmith.com/morae-features.html>

tamentos auxiliaram na definição do novo *plugin* de exploração proposto por este projeto de mestrado.

3.4 Implementação do protótipo Access8Math-NavMatBR com recursos de exploração utilizando o NVDA

A partir de todo o estudo feito, aliando as informações obtidas na revisão de literatura às evidenciadas nas entrevistas, bem como as lacunas obtidas pelos testes envolvendo o ChromeVox-NavMatBR foi elaborada uma nova abordagem de exploração visando minimizar os problemas evidenciadas pelo estudo e fornecer recursos para melhorar a navegação.

Diferente do primeiro protótipo apresentado por Silva et al. (2018), a nova versão implementada e apresentada por este trabalho foi realizada sobre o leitor de telas NVDA utilizando como base o *plugin* Access8Math² desenvolvido por Tseng (2018). A mudança se deu pela maior aceitação e utilização do NVDA (Everis Brasil, 2018), além de o NVDA fornecer um suporte para leitura tanto em ambiente Web quanto no próprio *desktop*. Acrescenta-se a isso o fato de o Access8Math ser um *plugin open source*, o que permite ao desenvolvedor a oportunidade de atuar sobre o código realizando manutenções, sejam elas corretivas ou evolutivas.

Além da mudança na escolha do leitor de telas, o protótipo foi implementado tendo como base a estratégia de exploração contextual e leitura por abstração de complexidades proposta por (STEVENS; EDWARDS; HARLING, 1997) e utilizada até mesmo em versões mais recentes do MathPlayer (SOIFFER, 2015). Desse modo, além de possibilitar a interação do usuário com a fórmula, o leitor é capaz de abstrair informações complexas da fórmula, informando ao usuário apenas o que é de fato necessário no momento da leitura. Para tanto, o processamento da fórmula parte da definição do que são elementos complexos e elementos simples.

Para o desenvolvimento do protótipo foi convencionado que um elemento complexo é uma estrutura matemática formada por 2 ou mais elementos estruturais. Por outro lado, elementos simples são compostos por apenas um elemento.

Sendo assim, na dinâmica de leitura, ao se deparar com uma fórmula o leitor de telas teria duas opções:

1. Ler o elemento, caso seja simples.
2. Anunciar o tipo da estrutura, caso seja uma estrutura complexa, como uma fração.

² Disponível em: <https://addons.nvda-project.org/addons/access8math.en.html>

Quanto a interação com a fórmula, o novo protótipo foi implementado utilizando os mesmos padrões de exploração definidos pelo leitor de telas NVDA, sendo acrescentado apenas um atalho (definido com as teclas CTRL + ALT + A) destinado à ativação e desativação da abstração de complexidade. A utilização das teclas padrões do NVDA, bem como a redução na criação de novos atalhos foram feitas pensando em minimizar a curva de aprendizado e adaptação por parte do usuário. A estratégia implementada será melhor detalhada na Seção 4.4.

Figura 3.1 – Construção da fórmula de Bhaskara utilizando notação MathML

```

1 <mathrow>
2   <math>x</math>
3   <math>=</math>
4   <math>\frac{</math>
5     <mathrow>
6       <mathrow>
7         <math>-</math>
8         <math>b</math>
9       </mathrow>
10      <math> \pm \sqrt{</math>
11        <mathrow>
12          <mathsup>
13            <math>b</math>
14            <math>^2</math>
15          </mathsup>
16          <math>-</math>
17          <mathrow>
18            <math>4</math>
19            <math>\times</math>
20            <math>a</math>
21            <math>\times</math>
22            <math>c</math>
23          </mathrow>
24        </mathrow>
25      </mathrow>
26    </mathsup>
27  </mathrow>
28  <mathrow>
29    <math>^2</math>
30    <math>\times</math>
31    <math>a</math>
32  </mathrow>
33 </mathfrac>
34 </mathrow>

```

Fonte: Do autor (2020)

A linguagem de marcação considerada para a implementação do *plugin* foi o MathML (MINER; ION; CARLISLE, 2014). A escolha pelo MathML deveu-se ao fato de ser uma

linguagem de marcação de padrão XML (BRAY et al., 2008) recomendada pelo W3C, cujo objetivo é a descrição de notações matemáticas com uma estrutura que denote sua semântica. Além disso, atualmente os leitores de tela que oferecem suporte para leitura de fórmulas matemáticas são implementados tendo como base a estrutura definida pelo MathML. Ademais, o uso do MathML possibilita trabalhar com estruturas matemáticas bem definidas. Isso se deve ao fato de que a linguagem é composta por *tags* específicas que determinam o tipo de elemento descrito. No contexto deste trabalho, o fato de o MathML trabalhar com *tags* de definição estrutural proporcionou meios de definir elementos como sendo complexos ou simples.

A Figura 3.1 demonstra como seria a codificação em MathML da Fórmula 3.1. As linhas da Figura 3.1 foram enumeradas para facilitar a análise. A Tabela 3.4 apresenta algumas linhas exemplificando a caracterização que será feita pelo protótipo de exploração aqui apresentado a partir da estrutura em MathML da fórmula em questão.

$$x = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (3.1)$$

Tabela 3.4 – Classificação feita pelo protótipo de exploração matemática a respeito da complexidade dos elementos da estrutura matemática apresentada na Figura 3.1

Linha	Classificação do elemento	Justificativa
2	Simple	Elemento atômico x
3	Simple	Elemento atômico =
4	Complexo	Grupo de elementos aninhados sob <frac>
7	Simple	Elemento atômico -
8	Simple	Elemento atômico b
10	Simple	Elemento atômico ±
11	Complexo	Grupo de elementos aninhados sob <sqrt>
13	Complexo	Grupo de elementos aninhados sob <sup>
14	Simple	Elemento atômico b

Fonte: Do autor (2020)

3.5 Testes de Usabilidade do Access8Math-NavMatBR com Exploração Contextual

Foram realizados testes sobre o sistema Access8Math-NavMatBR a fim de verificar questões relacionadas à usabilidade do sistema. O protocolo utilizado na aplicação dos testes foi o *think-aloud*.

3.5.1 Participantes

Para a realização dos testes foram selecionados 6 participantes de diferentes idades, escolaridade e tipos de deficiência. Devido a limitação imposta pela pandemia do novo Corona Vírus, todos os testes foram realizados de forma remota, por essa razão foram selecionados participantes com experiência com leitores de tela. A Tabela 3.5 apresenta os dados demográficos dos participantes do teste.

Tabela 3.5 – Dados demográficos dos participantes do teste com o *addon* Access8Math-NavMatBR

Cod.	Idade	Gênero	Deficiência	Principal Leitor de Telas	Experiência com Leitor de Telas	Escolaridade
D1	33	M	Baixa visão congênita	NVDA	11 anos	Pós graduação
D2	27	M	Cegueira total adquirida	NVDA e VoiceOver	11 anos	Pós graduação
D3	42	M	Baixa visão adquirida	NVDA, VoiceOver e Talkback	12 anos	Superior completo
D4	32	M	Glaucoma congênito evoluído para cegueira total	NVDA e VoiceOver	15 anos	Superior em andamento
D5	32	M	Glaucoma congênito evoluído para cegueira total	NVDA, VoiceOver e Talkback	9 anos	Superior em andamento
D6	27	F	Cegueira total adquirida	NVDA	15 anos	Superior completo

Fonte: Do autor (2020)

O recrutamento dos participantes foi feito a partir de uma publicação em um grupo da rede social Facebook, denominado "Mundo Cegal"³ destinado a pessoas com deficiência visual. Na publicação, foi disponibilizado o telefone do autor dessa dissertação para o agendamento e esclarecimento a respeito dos testes com o *addon* Access8Math-NavMatBR.

Todos os testes foram gravados a fim de possibilitar a análise de aspectos comportamentais que indiquem conforto ou inquietação quanto ao software testado.

³ Disponível em: <https://www.facebook.com/groups/295647170619576>

3.5.2 Tarefas

No trabalho apresentado por Abreu et al. (2019), os autores realizaram os testes disponibilizando 4 fórmulas matemáticas para serem lidas pelo Leitor de Telas testado, e posteriormente apresentaram aos participantes as mesmas fórmulas em versão tátil, a fim de verificar a compatibilidade da percepção do participante quanto as duas formas. A ideia inicial deste projeto seria utilizar da mesma abordagem, a fim de conseguir realizar uma melhor comparação de resultados. Entretanto, devido ao isolamento social imposto por ocasião da pandemia do novo Corona Vírus, não foi possível realizar os testes seguindo a mesma abordagem.

As tarefas aplicadas aos participantes seguiram a mesma linha proposta por Abreu et al. (2019). Entretanto, a verificação de compatibilidade de percepção feita através da leitura tátil foi substituída por um questionário aplicado a cada uma das fórmulas a fim de verificar a assertividade da compreensão dos participantes. A seguir é apresentada uma lista com as 4 fórmulas utilizadas na aplicação dos testes. Na Tabela 3.6 estão apresentadas as questões aplicadas após a leitura de cada uma das fórmulas.

- Fórmula 1: $(3 - \frac{1}{2})$
- Fórmula 2: $-2^3 \times (40 \div \frac{18}{\sqrt{36}}) \times (3 - \frac{1}{2})$
- Fórmula 3: $\frac{32 + \sqrt[3]{\frac{128}{2}}}{8 + \sqrt{4}} \pi$
- Fórmula 4: $\frac{-4^6 \times (18 \div \frac{12}{\sqrt{25}}) \times (9 - \frac{1}{3})}{8^5 \times (\sqrt[4]{81} \div 3)}$

3.5.3 Aplicação dos testes

A partir da publicação no grupo "Mundo Cegal", os usuários interessados em participar do teste entravam em contato com o autor deste trabalho e agendavam os testes. Posteriormente ao agendamento, era enviado aos participantes um email contendo:

- Termo de Consentimento: usuário era solicitado a ler e responder o email caso aceitasse participar dos testes.
- Arquivo de calibração: arquivo HTML contendo 2 fórmulas matemáticas utilizadas para o treinamento do usuário quanto a utilização do *addon*.

Tabela 3.6 – Perguntas aplicadas sobre as fórmulas utilizadas nos testes de usabilidade sobre o *addon* Access8Math-NatMatBR

Fórmula	Pergunta	Forma de resposta
1	Qual o numerador da fração?	Aberta
2	Existe expoente na fórmula?	Sim, Não ou Não sei
2	Qual o expoente da fórmula?	Aberta
2	Qual o numerador da primeira fração?	Aberta
2	Qual o denominador da primeira fração?	Aberta
2	Existe raiz na fórmula?	Sim, Não ou Não sei
2	Qual o conteúdo da raiz?	Aberta
2	Qual o grau da raiz?	Aberta
3	Existe expoente na fórmula?	Sim, Não ou Não sei
3	Qual o expoente da fórmula?	Aberta
3	Qual é o conteúdo da primeira fração?	Aberta
3	Qual é o conteúdo da raiz do numerador?	Aberta
3	Qual o grau da raiz do numerador?	Aberta
3	Qual é o conteúdo da raiz do denominador?	Aberta
3	Qual o grau da raiz do denominador?	Aberta
4	Existe algum expoente na fórmula?	Sim, Não ou Não sei
4	Qual o expoente?	Aberta
4	Qual é o conteúdo da primeira fração?	Aberta
4	Qual o conteúdo da raiz do numerador?	Aberta
4	Qual o conteúdo da raiz do denominador?	Aberta
4	Existe alguma fração no denominador?	Aberta

Fonte: Do autor (2020)

- Arquivo de testes: arquivo HTML contendo as fórmulas matemáticas descritas na Seção 3.5.2.
- Arquivo de instalação do *addon*.

Além dos arquivos enviados aos participantes, o autor deste trabalho preparou um guia de instalação do *addon* no NVDA. Entretanto nenhum dos participantes necessitou de apoio para realizar o processo de instalação.

Todos os testes foram realizados de forma virtual a partir de ligações utilizando o Google Meet ou Whatsapp, a depender da preferência do participante. Todos os testes tiveram seus áudios gravados, com o consentimento dos participantes. A escolha pela gravação se deu pela necessidade de se obter um mapeamento exato das interações dos usuários e conteúdos gerados a partir dos testes. É importante ressaltar que apenas o autor deste trabalho possui acesso às gravações.

No momento do teste, após a instalação do *plugin*, os usuários eram convidados a abrir o arquivo de calibração para receberem instruções de como utilizar a ferramenta. As instruções

incluíam desde uma explicação do funcionamento da exploração por abstração de complexidade, quanto como utilizar as teclas de atalho. Nesse momento os participantes eram solicitados a fazer a leitura das fórmulas e explorá-las da forma como desejassem e pelo tempo que precisassem. Os testes só eram iniciados após esse primeiro contato com o *plugin*.

Passada a etapa de calibração, os usuários eram solicitados a abrir o arquivo de testes e começar a ler cada uma das 4 fórmulas apresentadas na Seção 3.5.2, seguidas da aplicação de suas respectivas perguntas.

Além das perguntas específicas, após cada fórmula o pesquisador solicitava que os usuários categorizassem o nível de dificuldade encontrado na leitura da fórmula utilizando uma escala pré-definida, como 1 a 5, onde 1 significa muito difícil e 5 muito fácil.

Por fim, após a realização de todas as tarefas, foi aplicado um questionário de satisfação sobre a utilização do sistema. O questionário escolhido para essa etapa foi o SUS (*System Usability Scale*) (BROOKE et al., 1996). A escolha pelo SUS se deu por algumas características: ampla utilização na literatura, tamanho do formulário, capacidade de análise de questões envolvendo a usabilidade e, mesmo que com foco menor, possibilidade de captura de medidas a respeito da facilidade de aprendizado na utilização do sistema. O questionário aplicado encontra-se no Apêndice A⁴.

3.5.4 Análise de Dados

A partir das gravações dos testes, foi feito um levantamento dos relatos dos participantes quanto a utilização do Access8Math-NavMatBR, contabilizando 52 registros de problemas.

As análises desses registros foram realizadas utilizando elementos da metodologia de Análise Temática (BRAUN; CLARKE, 2006), de modo a identificar temas emergentes. O processo de análise temática contou com uma rodada de codificação aberta, feita pelo pesquisador principal deste trabalho. Após a codificação aberta, o pesquisador orientador realizou uma conferência dos temas estabelecidos e posteriormente foi feita uma discussão a respeito dos pontos de discordância. A partir deste processo foram identificados 3 temas: Interação com Fórmulas (22 ocorrências), Narração de Fórmulas (27 ocorrências) e Plataforma (3 ocorrências).

Cada um dos relatos passou ainda por uma categorização seguindo o mesmo processo de codificação aberta, conferência e discussão, resultando em 25 categorias diferentes.

⁴ O questionário foi gerado utilizando a ferramenta JotForm disponível em: <https://www.jotform.com>

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos por meio deste trabalho de mestrado.

O restante do capítulo encontra-se dividido da seguinte forma: na Seção 4.1 é apresentada uma análise sobre os dados coletados na entrevista com pessoas com deficiência. Na Seção 4.2, são feitas considerações a respeito das implicações causadas pelos dados obtidos nas entrevistas sobre a proposta de exploração em fórmulas matemáticas proposta. Por fim, na Seção 4.4 é apresentada a estratégia de exploração de fórmulas matemáticas elaborada.

4.1 Análise de dados coletados em entrevista

Como parte do processo de desenvolvimento deste trabalho, conforme consta na Seção 3.2 e Seção 3.2.1, foram realizadas entrevistas semi-estruturadas com pessoas com deficiência visual de diversas idades e níveis de escolaridade pela equipe do projeto NavMatBR. A intenção das entrevistas era evidenciar dificuldades encontradas no aprendizado e manipulação da matemática por parte de pessoas com deficiência visual. Além disso, esperava-se ser possível identificar estratégias utilizadas para mitigar estas fragilidades, tanto por parte dos alunos quanto por parte dos professores. O autor deste projeto de mestrado participou na análise dos resultados das entrevistas, que são reportados neste capítulo.

4.1.1 Participantes

Este estudo contou com a participação de doze pessoas com deficiência visual, oriundos dos estados de Minas Gerais e Mato Grosso, sendo 7 do sexo masculino e 5 do sexo feminino.

A faixa etária dos participantes variou entre 9 e 65 anos, incluindo crianças em idade escolar e pessoas com deficiência visual que passaram por diversos níveis de formação escolar. Dentre eles, 5 eram considerados cegos (com pouca ou nenhuma visão residual), sendo um congênito. Os outros 7 eram considerados pessoas com baixa visão, com diferentes níveis de visão residual.

As observações sobre o domínio de Braille e uso de leitores de tela são feitas nas subseções a seguir.

4.1.2 O uso de leitor de telas e dispositivos de interação

A partir das entrevistas, foi possível identificar participantes com níveis variados de utilização de sistemas leitores de tela. O estudo incluiu participantes que no momento das entrevistas não utilizavam sistemas leitores de tela até usuários avançados desse tipo de sistema.

Verificou-se que muitos participantes mais jovens ainda haviam tido pouca exposição ao uso de leitores de tela para uso de computadores.

Por outro lado, nove dos doze participantes apontaram utilizar leitores de tela em seus celulares *smartphones* para todo tipo de tarefa do dia-a-dia. Sendo o uso de computadores *desktop* limitado à situações específicas como atividades acadêmicas e de trabalho.

Três participantes reportaram dificuldades e problemas para adaptação no início da utilização de sistemas leitores de tela. Outros participantes que utilizam leitores afirmaram terem tido boa experiência desde o início.

4.1.3 Vivência de aprendizado de Matemática na escola por pessoas com deficiência visual

Dos participantes deste estudo, dois passaram a ter deficiência visual após o período escolar, e portanto tiveram aulas de Matemática básica enquanto ainda enxergavam. Dos dez restantes, seis relataram ter tido experiências negativas com aulas de matemática.

Muitos relataram que havia falta de preparo dos professores e da escola em geral. Vários comentaram que sentiam-se sem apoio durante as aulas, com frequentes relatos de menção a elementos visuais sem a devida transcrição.

4.1.4 Dificuldades com conteúdo matemático

Além de reclamações relacionadas a questões estruturais de escolas e preparo de professores, vários participantes apontaram dificuldades específicas com determinados tipos de conteúdos matemáticos.

São relatados nesta seção alguns desses casos, que fornecem oportunidades para intervenções com sistemas interativos.

Como esperado, houve forte indicação de problemas relacionados a conteúdos matemáticos com características visuais. A seguir, é incluído um relato do Participante 10 em relação a conteúdos de geometria.

"... eu já enxerguei uma época, mas [tinha] noção, conhecia as fórmulas, (sic) muito desenho matemático não, [então] quando é conteúdo muito visual, principalmente figuras geométricas, aqueles como fala de diâmetro, raio, ... aí complica."

O Participante D5 também deu relatos de dificuldades com as formas de explicação sobre fórmulas desenhadas na lousa com excesso de referências visuais sem acompanhamento de indicações de conteúdo, conforme transcrito a seguir.

"... quando a gente ia pesquisar fórmula na internet, é a formulas que tinha la, é tudo desenhado né, aí não dava, a gente acaba que não [conseguia] pesquisar, aí quando o professor passava a formula a gente que adaptava no word."

O participante D10 também apontou dificuldades com a utilização de materiais em vídeos online, conforme relatado a seguir.

"quando (sic) tá se preparando pro concurso pra alguma prova alguma coisa assim a gente se utiliza da internet néh a gente recorre ao youtube... [mas] quando é fórmula matemática por exemplo ele fica apontando óh... pegue esse resultado aqui leva pra ca calcula divide subtrai e você não ta entendeu ele (sic) tá falando todo o processo ali pra quem (sic) tá enxergando..."

As dificuldades com a manipulação de fórmulas e gráficos foi bastante frequente entre os participantes, com especial ênfase em dificuldades com elementos específicos que necessitam de habilidades visuais para determinar.

Além disso, também houve relatos de participantes mais jovens em relação a grande dificuldade para aprendizado até mesmo de operações básicas, em relação à abstração dos conceitos matemáticos envolvidos.

4.1.5 Abordagens e recursos utilizados para o ensino e aprendizagem de matemática

Além dos relatos de dificuldades no aprendizado, alguns participantes relataram algumas experiências positivas e estratégias utilizadas por professores que tiveram sucesso.

Essas estratégias envolviam, na maior parte, o uso de materiais manipulativos com tato, estratégias de verbalização, e mesmo a promoção de oportunidades de colaboração entre estudantes com deficiência visual e outros estudantes.

Também houve vários relatos do uso de estratégias de acompanhar formas geométricas, com outras pessoas pegando a mão de pessoas com deficiência visual para elas acompanharem formas e limites. Por exemplo, o participante D5 forneceu relato contendo experiências com colaboração de colegas e estratégias para auxiliar na compreensão de conteúdos gráficos.

"Aprendia juntamente com outros alunos, as provas eram feitas com um auxílio de um leitor. Muitas vezes quando envolvia conteúdo visual, os alunos ou professores pegavam minha mão e desenhavam com ela, assim com o movimento feito por elas com minha mão conseguia perceber o conteúdo."

O uso de materiais que deixavam linhas e traços em relevo também foi relatado por vários participantes, como mostrado no trecho a seguir, do participante D10.

"... com base no desenho, a professora passava, por exemplo o Triângulo retângulo, ela me dava numa folha sulfite, desenhava no papel silicone, ela me dava o problema no computador, eu passava a mão e... eu ia no computador, eu passava a mão e ia tendo a noção para fazer o problema."

Os participantes também relataram uso de outros recursos mais clássicos usados na educação de pessoas com deficiência visual, como o Soroban - um dispositivo similar ao ábaco para realização de operações - e o Braille como no relato do participante D12.

"...na época que eu estudei então eu não tinha acesso ao computador porque eu ainda não tinha o uso de leitores de tela... então eu fazia manual com o Braille e o soroban..."

O Participante D12 também relatou experiência positiva com professor que fazia esforços para fazer a narração de fórmulas e conteúdos matemáticos de forma detalhada, e provendo contexto para facilitar o entendimento, conforme relato a seguir.

"...eu cheguei na diretora e pedi pra ela me mudar de sala, tinha outro professor de matemática então ela me colocou com outro professor onde me colocava pra sentar na mesa com ele... ele tinha aquela paciência de falar número por número, abre colchete fecha colchete, símbolo tal, eu ia escrevendo tudo em Braille, então foi o momento que eu mais escrevi dentro de sala de aula a matemática..."

4.1.6 Sugestões para interação com leitura de fórmulas

Ao final da entrevista, os participantes foram indagados sobre sugestões para melhorias nas aulas de matemática e nos recursos de Tecnologia Assistiva utilizados, em particular aqueles para leitura de fórmulas.

No contexto mais geral, os participantes apontaram a necessidade de melhorias no auxílio profissional que é oferecido aos alunos, em particular, com melhor treinamento, e avanço nas estratégias de preparação de material adaptado para estudantes com deficiência visual. Também indicaram a necessidade de evolução nos recursos de Tecnologia Assistiva disponíveis, ainda

repletos de limitações, bem como nas formas de integrar os recursos computacionais utilizados com os demais recursos e formas de condução das aulas.

Em relação a exploração de conteúdo matemático, particularmente, alguns participantes com maior experiência com leitores de tela apontaram sugestões interessantes em relação a teclas de atalho para exploração de elementos estruturais de fórmulas. A seguir, é relatado um trecho de depoimento do participante D2.

"[Seria bom ter] teclas de atalho que poderiam ir direto as fórmulas, possibilidades de navegação dentro da fórmula (poder ir e vir por ela)."

O participante D5 também relatou a importância da implementação desse tipo de recurso de exploração, com diferentes níveis de exploração dos conteúdos, conforme transcrito a seguir.

"Implementar meios de navegação por essas fórmulas, parte por parte e depois o completo. Outra implementação que seria interessante, pode se espelhar na essência do Braille, pois o Braille é muito importante no aprendizado, porque quando o (sic) deficiente visual está lendo em Braille ele cria a imagem do que está lendo, assim pegando o exemplo de uma fórmula matemática o usuário teria condições de criar uma imagem dessas fórmulas. Minha sugestão de implementação seria um criar um "botão/ comando" para dar mais detalhes sobre a fórmula que está sendo lida, falar cada detalhe dos sinais, para que o deficiente possa criar essa imagem, assim facilitando o aprendizado."

4.2 Análise de dados e implicações sobre a proposta de exploração de fórmulas matemáticas

A partir da observação dos resultados das entrevistas, confirmou-se que, de fato a utilização de leitores de tela para conteúdos matemáticos por pessoas com deficiência visual era muito limitada, e só ocorria quando os professores, colegas ou profissionais de apoio transcreviam as fórmulas em editores de texto. Este fato pode reforçar a hipótese do despreparo dos leitores e a necessidade de estratégias para atender as especificidades presentes na leitura matemática. Pensando nisto, unindo os dados levantados em entrevistas aos do estado da arte foi elaborado um novo *plugin* para a exploração de conteúdo matemático utilizando a estratégia de exploração contextual.

Um dos pontos de sensibilidade quanto à compreensão da fórmula por parte de pessoas com deficiência visual encontra-se na facilidade de ocorrência de ambiguidades na transmissão sonora da matemática (BOUCK; WENG, 2014). Segundo Cahill e Boormans (1994), a mecânica de leitura e escrita das notações é tão difícil que acabam atrapalhando o pensamento

matemático. A exemplo disto tem-se a seguinte narrativa feita por um leitor de telas: "x dividido por b + c". Sobre essa leitura cabem-se duas representações matemáticas: $\frac{x}{b+c}$ ou ainda $\frac{x}{b} + c$.

Outro ponto importante a ser considerado é a grande quantidade de informações que os leitores com deficiência visual precisam memorizar para trabalhar com fórmulas matemáticas. Raman (1994) evidencia essa dificuldade fazendo um paralelo com o modelo de manipulação por parte de pessoas sem deficiência visual. Segundo o autor, o trabalho para utilizar matemática por pessoas sem deficiência é feito utilizando o apoio de uma memória externa como anotações em papel. Quando observa-se a interação por pessoas com deficiência visual, percebe-se que este apoio de memorização externa é difícil de ser utilizado. Isto pode fazer com que a manipulação matemática seja um processo ainda com mais sobrecarga cognitiva quando feito por pessoas não videntes, uma vez que todas as informações precisarão ser memorizadas sem o apoio externo.

Outra questão também analisada por autores da área sobre as metodologias de exploração de fórmulas matemáticas atuais é a respeito da complexidade estrutural apresentada pelas exploração em árvore ((STEVENS; EDWARDS; HARLING, 1997; SORGE et al., 2014)).

Conforme descrito na Seção 2.3, atualmente as metodologias de exploração se baseiam principalmente em 2 tipos: linear e em árvore.

Ao realizar uma leitura de fórmula matemática, devido à quantidade de elementos e símbolos utilizados e à complexidade da informação passada, segundo Sorge et al. (2014) é necessário realizar a leitura repetidas vezes para garantir a compreensão. Segundo as heurísticas de Nielsen a respeito da usabilidade de um sistema, dois dos pontos necessários para interação com o usuário são a eficiência e o controle do usuário. Em se tratando de abordagens puramente lineares, a interação do usuário com a fórmula é limitada ou ainda anulada. Essa limitação pode dificultar a interação do usuário com a fórmula lida. Essa interação mais passiva pode ocasionar a necessidade da leitura completa da fórmula, uma vez que em alguns casos o usuário não possui a possibilidade de ler apenas alguns trechos.

Uma outra estratégia de exploração adotada nas pesquisas encontradas no estado da arte é a exploração em árvore (STEVENS; EDWARDS; HARLING, 1997; GAURA, 2002; FERREIRA; FREITAS, 2006; SORGE et al., 2014; SOIFFER, 2015). Nesta estratégia, conforme descrito na Seção 2.3, o que se tem atualmente são formas de exploração que dependem da compreensão estrutural de estrutura de dados em árvores. Conhecimentos como estes não são

fornecidos na educação básica. Por este motivo, pode se tornar também um limitante no manuseio e conseqüentemente compreensão do conteúdo lido.

De modo geral, a partir dos dados obtidos pela entrevistas, é possível identificar alguns problemas que precisam ser sanados pelo novo *plugin* de exploração desenvolvido:

- ambigüidade na transmissão de informação;
- grande quantidade de informação necessária de ser memorizada;
- baixa interação do usuário com a fórmula;
- grande dependência de conhecimento estrutural prévio.

4.3 Análise dos testes envolvendo estratégia de exploração de fórmulas matemáticas - ChromeVox-NavMatBR

Com a realização dos testes envolvendo o ChromeVox-NavMatBR apresentados por Abreu et al. (2019) com a participação do autor deste trabalho, foi possível capturar ao todo 3 horas e 4 minutos de gravação de vídeo que foram analisadas em conjunto com as anotações feitas no decorrer das aplicações dos testes e ao final foi possível obter os dados que se seguem nesta seção.

4.3.1 Compreensão das tarefas

Um dos pontos verificados por Abreu et al. (2019) com a execução das tarefas foi quanto a compreensão dos participantes a respeito do que estava sendo lido. A verificação da compreensão baseou-se na comparação entre a fórmula entendida por meio da leitura dos usuários utilizando do software leitor de telas ChromeVox-NavMatBR e a sua percepção por meio da leitura por formas táteis.

Para que os usuários pudessem fazer essa comparação, foram providenciadas, além das fórmulas em modo digital disponíveis em uma página na *web*, fórmulas escritas em alto relevo ou Braille.

A partir dessa comparação, o que foi obtido por Abreu et al. (2019) encontra-se descrito na Tabela 4.1. Nesta tabela é possível verificar que o participante que teve maior dificuldade na compreensão das fórmulas foi o T2. É importante destacar que o mesmo declarou ser usuário iniciante de leitores de telas.

Tabela 4.1 – Compreensão dos usuários sobre as tarefas apresentadas utilizando a primeira versão do ChromeVox-NavMatBR

Participante	Fórmula 1	Fórmula 2	Fórmula 3	Fórmula 4
T1	Compreendeu totalmente	Compreendeu parcialmente	Compreendeu parcialmente	Compreendeu parcialmente
T2	Não compreendeu	Compreendeu parcialmente	Compreendeu parcialmente	Não compreendeu
T3	Compreendeu parcialmente	Compreendeu parcialmente	Compreendeu parcialmente	Não compreendeu
T4	Compreendeu parcialmente	Compreendeu parcialmente	Compreendeu parcialmente	Compreendeu parcialmente
T5	Compreendeu totalmente	Compreendeu totalmente	Compreendeu parcialmente	Compreendeu parcialmente

Fonte: Do autor (2020)

A Figura 4.1 apresenta a quantificação dos dados obtidos sobre a corretude da percepção das fórmulas pelos participantes. Os níveis de compreensão foram separados em:

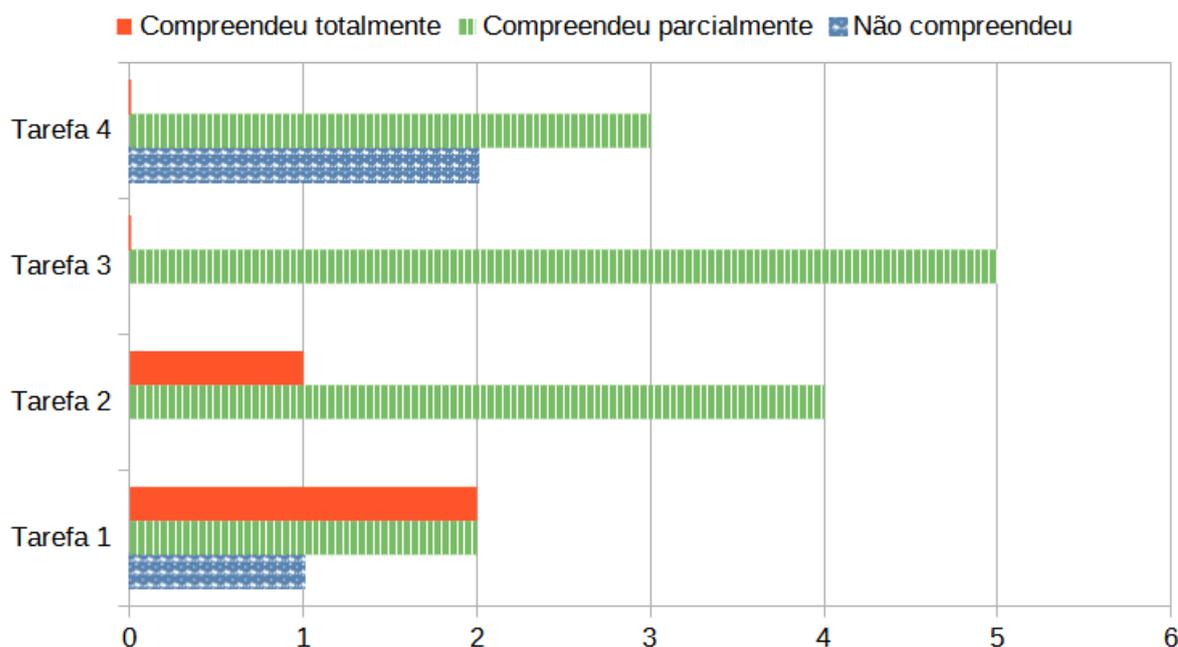
- Compreendeu totalmente: a percepção obtida pela leitura utilizando o software leitor de telas foi a mesma quando lida de forma tátil.
- Compreendeu Parcialmente: a compreensão da fórmula pela leitura utilizando o software leitor de telas foi em partes diferente da que foi alcançada pela leitura tátil. O participante verificou que alguns elementos da fórmula não foram percebidos quando lidos pelo ChromeVox-NavMatBR.
- Não compreendeu: os participantes não puderam identificar que a fórmula lida pelas duas maneiras se tratavam do mesmo conteúdo.

A Figura 4.1 demonstra que a taxa de compreensão das fórmulas foi decaindo a medida que a complexidade da fórmula aumentava. Um ponto de destaque é que mesmo na Fórmula 1 a compreensão não foi total, havendo ainda um participante que não conseguiu compreender a fórmula. É válido ressaltar que a Fórmula 1 foi considerada a mais simples, pelo fato de conter apenas uma subtração envolvendo uma fração.

Todas as fórmulas foram montadas com elementos matemáticos contemplados pela estratégia de exploração preliminar contida no ChromeVox-NavMatBR (SILVA et al., 2018). Entretanto, uma observação interessante obtida nos testes foi que os usuários, apesar de terem conseguido completar todas as tarefas, não fizeram uso das funcionalidade implementadas pelo leitor de telas, com exceção do usuário T5, que em alguns momentos fez uso da navegação por

frações. Esse fato pode significar que as funcionalidades implementadas não atenderam bem as necessidades dos usuários, ou ainda a escolha das teclas de atalho não tenham favorecido sua utilização.

Figura 4.1 – Quantificação dos dados a respeito da compreensão das fórmulas utilizando a primeira versão do ChromeVox-NavMatBR

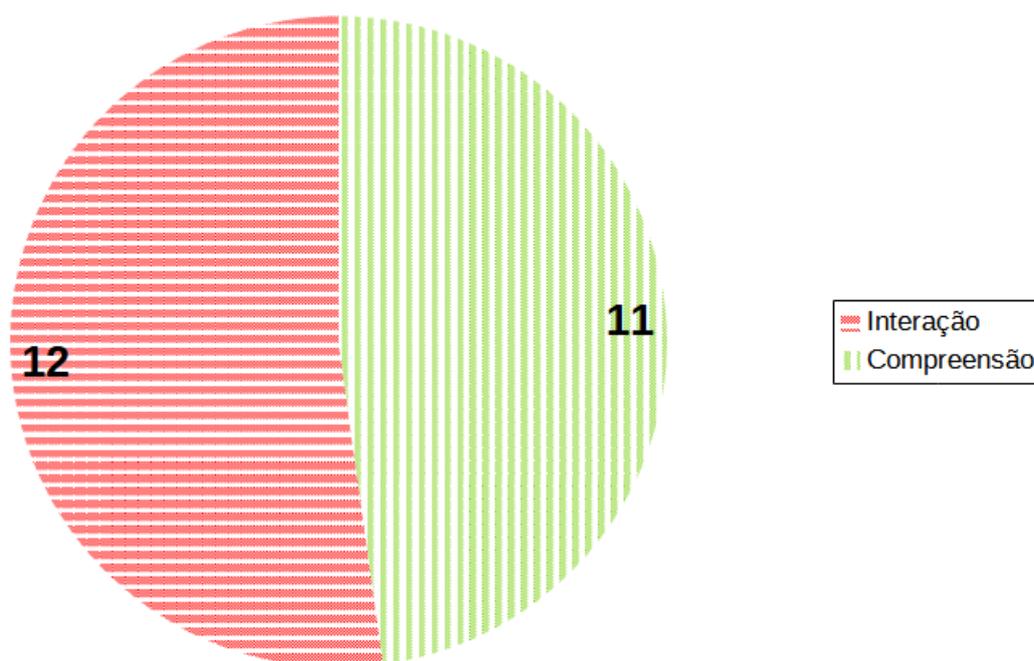


Fonte: Adaptado de Abreu et al. (2019)

4.3.2 Análise de usabilidade

No decorrer da execução das atividades, ao que descreve Abreu et al. (2019), os usuários foram instruídos a narrar quaisquer dificuldades que tivessem com relação aos aspectos do sistema. Por meio do *think-aloud*, alguns problemas de usabilidade foram encontrados e categorizados em 2 tipos de erros: erros de interação e erros de compreensão. Dentro dos erros de interação estão erros relacionados à utilização das teclas de exploração, *feedback* e tempo de resposta do sistema. Os erros de compreensão englobam problemas relacionados à má percepção do conteúdo lido. É importante ressaltar que todos os usuários reportaram algum tipo de problema. Os participantes T3 e T5 encontraram 5, enquanto os demais localizaram 4 cada um. A Figura 4.2 apresenta os problemas encontrados e suas respectivas ocorrências.

Figura 4.2 – Quantificação dos dados a respeito dos problemas encontrados na utilização da primeira versão do ChromeVox-NavMatBR



Fonte: Adaptado de Abreu et al. (2019)

4.3.2.1 Problemas relacionados à interação

Conforme descrito por Abreu et al. (2019), ao utilizar o leitor de telas ChromeVox-NavMatBR, alguns usuários não obtiveram uma boa experiência quanto a alguns aspectos de sua interação com o sistema. Um dos problemas reportados se referia a escolha e utilização da tecla de comando padrão, alguns usuários tentaram escolher teclas que eram bloqueadas pelo ChromeVox por se tratarem de teclas utilizadas pelo próprio leitor como a tecla *Ctrl* e a tecla espaço. Outra dificuldade obtida pelos usuários era a respeito do tempo gasto entre a execução de uma ação pelo participante e sua respectiva realização no sistema. Quanto a essa dificuldade os usuários ficavam confusos sem saber se suas ações haviam gerado algum resultado ou se precisariam aguardar para não correr risco de ter alguma reação não esperada ao realizar uma nova ação. Além desses problemas, 5 usuários assinalaram não estarem confortáveis com a tonalidade e dicção da voz utilizada.

Os usuários também reportavam problemas sobre a memorização das teclas de atalho das funcionalidades implementadas pelo ChromeVox-NavMatBR. Outros ainda não se lembraram das funcionalidades em si. Talvez estes problemas tenham sido causados pela especificidade das

funcionalidades e suas teclas. É importante lembrar que dentre as implementações do sistema estavam a navegação entre frações e raízes, por exemplo. Uma possível ação sobre isso seria tornar as funções mais gerais de modo a serem capazes de se aplicar a diversos contextos da matemática e não uma funcionalidade e uma tecla responsável por cada tipo de elemento.

4.3.2.2 Problemas relacionados à compreensão do conteúdo lido

Quanto aos problemas de compreensão, estes foram relacionados à percepção dos elementos explorados e lidos dentro das fórmulas.

Cinco usuários demonstraram dificuldades na leitura de divisão e fração. A leitura por esses elementos era feita através das narrativas: "dividido" para divisões e "dividido por" para frações.

Alguns usuários chegaram a fazer algumas sugestões para melhorar a leitura:

"Através da navegação que efetuei durante os testes, não consegui distinguir onde era divisão e onde era fração, pela leitura eu desconfiava que tinha frações nas fórmulas, porém não consegui identificá-las durante a leitura. Acho que poderiam fazer uma abordagem mais direta em relação a fração, tipo: na hora que for uma fração o leitor dizer 'fração', 'numerador', 'denominados'".
Participante T2

"Eu estava imaginando a fórmula de forma linear, a leitura 'divisão' e 'dividido por' geram dúvidas para o entendimento de uma divisão comum e uma fração. Creio que poderiam utilizar uma abordagem mais simples e direta, falando que é uma fração, e depois evidenciar o numerador e o denominador".
Participante T3

Outro problema obtido pelo *feedback* dos participantes foi a respeito da forma com que os elementos foram denominados. Em especial, 4 participantes não conseguiam compreender o que era o grau de uma raiz.

Diante dos problemas de compreensão foi possível identificar 2 pontos de atenção e de possível ação na nova abordagem elaborada. O primeiro dos pontos se refere a leitura da divisão e fração e sua distinção dentro do contexto da fórmula. Como pôde ser visto, os usuários não eram capazes de compreender a diferença dos dois elementos pela generalidade imposta nas duas narrações. Através das sugestões feitas pelos próprios participantes, foi possível perceber que em determinados momentos é importante que se faça um anúncio que seja capaz de levar o usuário a capturar a fórmula em toda a sua essência, dando a ele a capacidade de macro-visão sobre os elementos. Para isso, uma possível ação seria a narração de fato do elemento lido. Como sugeriram os participantes, nesse caso em específico poderia ser utilizado os termos:

"dividido" para divisão e "fração", juntamente com "numerador" e "denominador" ao se referir a uma fração. Tal sugestão é possível de ser estendida a outros cenários como a narração de um somatório, exponencial, logaritmo, entre outros.

O segundo problema foi a respeito da nomenclatura utilizada no sistema, por mais que todos os elementos tenham sido narrados através das perspectivas capturadas em entrevistas com professores, o que se fez possível perceber foi a necessidade de mais estudos visando tornar a leitura dos elementos o mais familiar possível aos usuários. Além disso, o fato da leitura causar certa confusão aos usuários corrobora ainda com o ideal defendido por este trabalho: a necessidade de criação de um sistema para leitura matemática no idioma Português, uma vez que mesmo a leitura no idioma próprio dos participantes criou margem para dúvidas quanto ao que foi lido.

4.4 Implementação do Access8Math-NavMatBR com estratégia de exploração contextual em fórmulas matemáticas

Tendo em vista todas as necessidades para leitura de fórmulas matemáticas para pessoas com deficiência visual identificadas na Seção 4.2 e Seção 4.3, foi desenvolvido um *plugin* de leitura matemática contendo a estratégia de exploração contextual que tem como característica a abstração de conteúdo complexo. Foi considerado como conteúdo complexo elementos na fórmula formados pela união de dois ou mais elementos como frações, raízes e logaritmos.

No âmbito da implementação do *plugin*, a abstração se dá por meio da narração indicativa do tipo de conteúdo e não do conteúdo completo em si. Deste modo, ao realizar a leitura de uma expressão contendo uma fração, por exemplo, o *plugin* não fará a leitura do conteúdo da fração diretamente, mas irá narrar o trecho apenas como "fração". A leitura do conteúdo do elemento complexo pode ser realizada a partir da solicitação do próprio usuário por meio do acionamento de tecla de atalho.

Estratégias de abstração como a apresentada são adotadas diariamente pelos usuários que navegam em páginas Web. Na leitura de um conteúdo, ao se deparar com links, por exemplo, o usuário é apenas informado que aquele elemento se trata de um link e - se feito de forma correta - é também informado do direcionamento que o link representa dentro do contexto lido (que pode ir para outra janela, por exemplo). Trazendo a forma com que a abstração de um link é feita para como uma fórmula será lida, visou-se obter a simplificação da leitura, informando ao usuário apenas o que é necessário para a compreensão da fórmula em diferentes níveis a

cada interação. Além disso, a estratégia fornece ao usuário a capacidade de se tornar um agente ativo, possibilitando a ele navegar para dentro dos "links" criados na fórmula.

A Tabela 4.2 apresenta as funcionalidades presentes na nova versão do leitor de telas contendo a estratégia proposta, bem como as funcionalidades já existentes provenientes da versão 2.1 do *plugin* Access8Math (TSENG, 2018), para o leitor de telas NVDA. Como é possível notar, as funcionalidades abordadas podem ser aplicadas a todos os tipos de elementos matemáticos da linguagem MathML.

Tabela 4.2 – Conjunto de funcionalidades que deverão estar presentes na nova versão do ChromeVox-NavMatBR contendo a exploração por elementos estruturais.

Funcionalidade	Explicação	Teclas
Interagir com a fórmula	Caso a exploração contextual esteja habilitada, possibilita ao usuário explorar a fórmula e realizar a leitura dos elementos abstratos. Caso a exploração contextual esteja desativada, um <i>pop-up</i> é aberto, que possibilita tanto o usuário copiar a fórmula quanto iniciar a exploração interna na árvore.	Espaço
Sair da interação	Fecha a interação com a fórmula.	ESC
Habilita/desabilita exploração contextual	Ao habilitar a exploração contextual, as fórmulas são lidas utilizando abstração de conteúdo complexo. Ao desabilitar, a leitura é feita no modo padrão do <i>plugin</i> , com exploração em árvore.	CTRL+ALT+A
<i>Zoom in</i>	Quando a exploração contextual estiver ativada, a funcionalidade irá entrar no escopo do elemento complexo abstraído e fazer sua leitura. Caso o modo de exploração corrente for a padrão, a funcionalidade irá navegar para dentro da árvore da fórmula.	Seta direcional para baixo
<i>Zoom out</i>	Quando a exploração contextual estiver ativada, a funcionalidade fará o usuário sair do contexto da abstração. Caso a funcionalidade esteja desativada, o usuário irá navegar para cima na árvore da fórmula.	Seta direcional para cima
Avançar/Recuar	Avançar/Recuar caracteres.	Setas direcionais para direita e esquerda

Fonte: Do autor (2020)

A abstração de conteúdo também pode oferecer ao usuário a possibilidade de concentrar-se apenas no que é relevante ao contexto que está sendo lido. Isso é feito de forma similar à leitura textual, na qual os leitores costumemente fornecem teclas de atalho para saltar menus e outros conteúdos irrelevantes e avançar explicitamente para o conteúdo principal. Fazendo isto, também, visou-se possibilitar a redução de conteúdo a ser armazenado mentalmente pelo usuário ao manipular uma fórmula. Este processo se justifica pelo fato de o usuário ter em mãos

apenas trechos da fórmula, que em seu contexto possuem significado específico. Essa concentração focada em trechos, além de reduzir a quantidade de elementos a serem memorizados também fornece a capacidade de visualizar de forma geral a fórmula, uma vez que abstraindo o conteúdo detalhado de cada elemento, houve também a redução dos elementos que compõem a fórmula. Sendo assim, ao se deparar com a Fórmula 4.1, o leitor de telas transmitirá ao usuário a narração "X é igual a uma fração".

$$x = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (4.1)$$

Como pode ser notado, a redução dos elementos lidos fornece ao usuário um *overview* da fórmula, que é capaz de auxiliar o mesmo na construção mental do que está sendo lido.

Nos moldes atuais, ao se deparar com a equação citada, o usuário poderia se perguntar, por exemplo:

- qual parte da fórmula está sendo dividida por $2a$?
- a raiz se refere somente ao b^2 ?

Ao abstrair o conteúdo, este tipo de ambiguidade pode ser minimizada, com a possibilidade de ler de forma isolada blocos específicos da fórmula.

A estrutura manipulada para a execução da leitura baseia-se também em uma estrutura de árvore. Porém, a abordagem realizada exige menor conhecimento prévio sobre a estrutura, diferente do que se tem atualmente no estado da arte na implementação dos leitores de tela atuais. A ausência de necessidade de conhecimento prévio se justifica pela exploração não ser realizada com as manipulações puras de uma árvore, onde descer e subir na estrutura de árvore (como representada pelo MathML) significa o aumento e diminuição de granularidade da fórmula como um todo. Na proposta elaborada, cada elemento é uma árvore e a exploração não é feita subindo ou descendo níveis, mas ditando se a leitura do nó em questão deve ser feita ou não.

A Figura 4.3 demonstra, de modo geral, como funciona o fluxo de leitura da estratégia desenvolvida. A Tabela 4.4 apresenta exemplos de interação possíveis de serem feitas pelo usuário sobre a equação apresentada na Figura 4.3 e resultado dessas ações utilizando o modo de exploração contextual.

Figura 4.3 – Fluxo de leitura utilizando a estratégia de exploração contextual no Access8Math-NavMatBR

I
 $x = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$

II
 $x = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$

III
 $x = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$

IV
 $x = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$

V
 $x = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$

Fonte: Do autor (2020)

Tabela 4.3 – Fluxo de leitura utilizando a estratégia de exploração por elementos estruturais da nova versão do ChromeVox-NavMatBR

Comando	Etapa	Narração
-	I	x igual à fração
<i>Zoom in</i>	II	x
Avançar elemento	III	igual
Avançar elemento	IV	numerador início menos b mais ou menos raiz quadrada numerador fim
Avançar elemento	V	denominador início 2 vezes a denominador fim

Fonte: Do autor (2020)

A implementação do protótipo de exploração em fórmulas matemáticas foi feita utilizando como base o *plugin* Access8Math (TSENG, 2018) do leitor de telas NVDA. O *plugin* em questão utiliza-se da linguagem de marcação MathML para a estruturação da leitura.

Como elementos principais do Access8Math, é possível citar:

- Regras de tradução: definição de como a leitura será feita a depender das tags de estrutura do MathML.
- Serializador: conjunto de funções Python que transformam o elemento matemático localizado pelo NVDA em uma estrutura manipulável dentro do código do *plugin*.
- *Listener* de comandos de entrada: funções Python que são disparadas a partir de comandos específicos do usuário e realizam ações como navegar entre os elementos da fórmula.

As regras de tradução são definidas em arquivos tabulados separados por idioma, o que possibilita a adaptação para novos idiomas. Nesse arquivo, cada linha representa a leitura de um determinado elemento estrutural do MathML.

Figura 4.4 – Exemplo de regras de leitura definidas no arquivo math.rule para o idioma Português

```

addon > globalPlugins > MathMLReader > locale > pt > math.rule
1 #
2 node , (.), item nó
3 mfrac fração com numerador, 0, e denominador, 1, final da fração numerador,denominador fração genérica fração
4 mfenced parênteses abertos, (.), parênteses fechados item parênteses genéricos
5 msqrt raiz quadrada de, (.), final da raiz item raiz quadrada raiz quadrada
6 mroot raiz a, 1, de, 0, final da raiz raiz,contagem raiz raiz

```

Fonte: Do autor (2020)

A Figura 4.4 apresenta um trecho do arquivo de regras em português. Cada uma das linhas do arquivo é lida de modo a separar a informação contida na linha em trechos específicos delimitados por *tabs*. As regras para leitura de fórmulas em Português foram baseadas nas regras utilizadas na implementação do ChromeVox-NavMatBR. Essas regras foram elaboradas a partir de estudos com professores de matemática que haviam atuado no ensino de pessoas com deficiência visual (LIMA et al., 2019).

Tomando como exemplo a linha 3 da Figura 4.4, é feita a definição de leitura do elemento `mfrac` do MathML. Na definição da regra, a linha é separada em 5 trechos de informação, como é possível verificar na Figura 4.5. A Tabela 4.4 apresenta a descrição do fluxo de leitura.

Figura 4.5 – Separação estrutural da regra de leitura da estrutura `mfrac`

<code>mfrac</code>	fração com numerador, 0, e denominador, 1, final da fração	numerador,denominador	fração genérica	fração
1	2	3	4	5

Fonte: Do autor (2020)

O trecho número 5 foi adicionado no contexto da implementação do protótipo apresentado nesta dissertação. Esta adição foi realizada para tornar possível a definição da forma de leitura dos elementos a partir de sua semântica no contexto matemático.

Para converter os elementos matemáticos provenientes do MathML em estruturas que utilizem as regras definidas no arquivo de tradução apresentado anteriormente, o código realiza um processo de serialização.

Tabela 4.4 – Explicação dos trechos da linha de definição de regras de leitura

Trecho	Conteúdo	Significado
1	mfrac	Tag do MathML que está sendo definida pela linha
2	fração com numerador, 0 , e denominador, 1 , final da fração	Forma como será feita a narração da tag definido. Os números presentes na leitura, definem trechos que deverão ser substituídos por elementos filhos da tag mfrac
3	numerador,denominador	Significado semântico dos números apresentados no trecho anterior
4	fração genérica	Nome da regra
5	fração	Forma como deve ser feita a leitura no modo de exploração contextual

Fonte: Do autor (2020)

O Código do Algoritmo 4.1 define a classe de leitura e serialização do conteúdo matemático a partir da leitura de código MathML.

Algoritmo 4.1 – Definição do *provider* de leitura matemática

```

1 import mathPres
2 from mathPres.mathPlayer import MathPlayer
3
4 class MathMlReader(mathPres.MathPresentationProvider):
5     def __init__(self, *args, **kwargs):
6         super(MathMlReader, self).__init__(*args, **kwargs)
7         self.mathcontent = None
8         self.mathReader = None
9
10    def getSpeechForMathMl(self, mathMl):
11        tree = mathml2etree(mathMl)
12        self.mathcontent = MathContent(A8M_PM.mathrule, tree)
13        globalVars.mathcontent = self.mathcontent
14        serializedContent = self.mathcontent.pointer.serialized()
15        return translate_SpeechCommand(serializedContent)
16
17    def interactWithMathMl(self, mathMl):
18        self.mathReader = MathMlReaderInteraction(mathMl=mathMl)
19
20 provider = MathMlReader
21 reader = provider()
22 config.conf["Access8Math"]["provider"] = reader.__class__.__name__
23
24 mathPres.registerProvider(reader, speech=True, braille=False,
25 interaction=True)

```

Fonte: Adaptado de Tseng (2018)

A partir da linha 20, é definida qual será a classe responsável pela leitura matemática. Neste caso, a classe responsável é a MathMlReader, definida no código como uma classe que

estende a classe `MathPresentationProvider` (linha 4). Essa especialização é necessária para utilizar a classe como provedor de leitura matemática.

Ao estender a classe `MathPresentationProvider` é necessário implementar 2 métodos: `getSpeechForMathML`, chamado pelo NVDA ao se deparar com algum elemento matemático; e `interactWithMathML`, método disparado ao pressionar o botão *space*, definido pelo próprio NVDA como botão de interação com o conteúdo.

O método `getSpeechForMathML` recebe como parâmetro uma string de MathML e a converte em uma estrutura de árvore a partir do método `mathml2etree`. Com o resultado dessa conversão, o código cria uma instância da classe `MathContent` utilizando as regras de tradução definidas anteriormente e a árvore de MathML. Após isso é feita a serialização do conteúdo em um texto a ser narrado pelo leitor de telas.

O método `interactWithMathML` cria uma nova instância da classe `MathMIReaderInteraction`, que estende a classe `MathInteractionNVDAObject`, responsável por ouvir os comandos do usuário e realizar a interação com a fórmula matemática.

A exploração interna do conteúdo matemático disparada a partir da classe `MathMIReaderInteraction` é feita a partir da classe `MathContent`, definida pelo Algoritmo 4.2.

O método `navigate` recebe como parâmetro uma ação de navegação que será refletida sobre o atributo `pointer` da instância da classe. Esse atributo contém uma referência para o nó da árvore do MathML que está sendo explorado no momento. Durante a exploração, como as setas para cima e para baixo são utilizadas para definir a entrada e saída em um elemento abstrato, o método implementa uma lógica de máquina de estado. Nesta lógica, caso o elemento esteja com uma leitura abstrata, sua leitura é modificada para leitura de elemento ao entrar na fórmula, e volta a ser abstrata ao sair da fórmula.

Conforme citado anteriormente, outro ponto importante do código são os *listeners* dos comandos de entrada. Além dos comandos padrão do NVDA, como setas direcionais e barra de espaço para iniciar interação com um elemento, é possível definir funções que sejam chamadas a partir de comandos específicos.

O Algoritmo 4.3, apresenta a definição da classe `GlobalPlugin` que é a classe de entrada do *plugin*. Em sua implementação, na linha 7 o método `script_switch_reading_strategy` é anotado com a anotação *script*. Essa anotação insere ao método uma lógica de execução baseada na escuta de um gesto realizado pelo usuário a partir do atributo `gesture`. Esse atributo recebe uma string contendo o ponto de partida do gesto e qual gesto deverá disparar o método. No

Algoritmo 4.2 – Definição da classe de serialização de conteúdo matemático

```

1  class MathContent(object):
2      def __init__(self, mathrule, et):
3
4          self.root = self.pointer = create_node(et, mathrule)
5          clean_allnode(self.root)
6          self.mathrule = mathrule
7          self.set_mathrule(self.mathrule)
8
9      def set_mathrule(self, mathrule):
10         self.mathrule = mathrule
11         set_mathrule_allnode(self.root, self.mathrule)
12         check_type_allnode(self.root)
13
14     def navigate(self, action):
15         pointer = None
16         if action == "downArrow":
17             if self.pointer.read_status == ReadStatus.ELEMENT:
18                 pointer = self.pointer.down()
19             elif self.pointer.read_status == ReadStatus.ABSTRACT:
20                 pointer = self.pointer
21                 pointer.read_status = ReadStatus.ELEMENT
22
23         elif action == "upArrow":
24             if self.pointer.read_status == ReadStatus.ELEMENT:
25                 pointer = self.pointer
26                 pointer.read_status = ReadStatus.ABSTRACT
27             elif self.pointer.read_status == ReadStatus.ABSTRACT:
28                 pointer = self.pointer.up()
29
30         elif action == "leftArrow":
31             pointer = self.pointer.previous_sibling
32         elif action == "rightArrow":
33             pointer = self.pointer.next_sibling
34         elif action == "home":
35             pointer = self.root
36
37         if pointer is not None:
38             self.pointer = pointer
39             return True
40
41     return False

```

Fonte: Adaptado de Tseng (2018)

código anterior, temos o *gesture* definido como "kb:control+alt+a". Em nível de execução, isso significa que o método em questão espera uma entrada a partir do teclado (kb: system keyboard input) e que essa entrada seja composta das teclas CTRL+ALT+A.

Algoritmo 4.3 – Definição da classe do *plugin* e criação de *listeners* de comandos de entrada

```

1 class GlobalPlugin(globalPluginHandler.GlobalPlugin):
2     '''
3     Codigo reduzido da classe contendo apenas os dados
4     necessarios
5     '''
6
7     @script(
8         gesture="kb:control+alt+a",
9         description=_("Enable abstract reading"),
10        category=ADDON_SUMMARY,
11    )
12    def script_switch_reading_strategy(self, gesture):
13        toggleAbstractMode()
14
15    def toggleAbstractMode():
16        if abstractModeToggle():
17            speech.speak(["Enabling abstract reading mode"])
18        else:
19            speech.speak(["Disabling abstract reading mode"])
20
21    abstractMode = False
22    def abstractModeToggle():
23        global abstractMode
24        abstractMode = not abstractMode
25        return abstractMode

```

Fonte: Adaptado de Tseng (2018)

Neste exemplo temos a única tecla de atalho definida pela nova versão do *plugin*, uma tecla que define se a leitura da fórmula será feita utilizando exploração contextual ou utilizando a versão original do *plugin*, realizando a exploração em árvore.

4.5 Avaliação dos testes de interação e compreensão das fórmulas utilizando o *plugin* Access8Math-NavMatBR

Para a realização dos testes com usuários em potencial do *plugin*, foram recrutados seis participantes. Os participantes recrutados tinham entre 27 e 42 anos. Os participantes incluíram pessoas com baixa visão congênita ou adquirida, cegueira adquirida e glaucoma congênito. Os participantes com baixa visão necessitavam primordialmente de leitores de tela para leitura de conteúdos como de fórmulas matemáticas. Os participantes possuíam entre 9 e 15 anos de experiência com leitor de telas. Quanto a escolaridade, os participantes tinham desde superior em andamento até pós-graduação completa.

O objetivo dos testes com usuários, além de analisar a usabilidade do *addon*, era verificar o quanto os usuários compreenderam das fórmulas a partir da leitura e exploração utilizando o *addon* Access8Math-NavMatBR. Conforme apresentado na Seção 3.5.2, foram feitas perguntas aos participantes a respeito de cada uma das fórmulas que foram lidas. A partir das respostas obtidas, foram estabelecidos diferentes níveis de compreensão para as fórmulas:

- Compreendeu totalmente: participante respondeu de forma correta todas as perguntas sobre a fórmula.
- Compreendeu parcialmente: participante respondeu a maioria das perguntas sobre a fórmula de forma correta, mas houve imprecisões na interpretação.
- Não compreendeu: participante respondeu a maioria das perguntas sobre a fórmula de forma incorreta.

As fórmulas utilizadas foram as seguintes:

- Fórmula 1: $(3 - \frac{1}{2})$
- Fórmula 2: $-2^3 \times (40 \div \frac{18}{\sqrt{36}}) \times (3 - \frac{1}{2})$
- Fórmula 3: $\frac{32 + \sqrt[3]{\frac{128}{2}}}{8 + \sqrt{4}} \pi$
- Fórmula 4: $\frac{-4^6 \times (18 \div \frac{12}{\sqrt{25}}) \times (9 - \frac{1}{3})}{8^5 \times (\sqrt[4]{81} \div 3)}$

A Tabela 4.5 apresenta o resultado de cada um dos participantes quanto a compreensão das fórmulas.

Pode-se observar na Tabela 4.5 que todos os participantes conseguiram compreender totalmente a fórmula 1, cinco dos seis participantes compreenderam totalmente a fórmula 2, e um participante compreendeu somente parcialmente. Três participantes compreenderam totalmente a fórmula 3, dois compreenderam parcialmente e um não compreendeu. Em relação à fórmula 4, três participantes compreenderam totalmente, e três compreenderam parcialmente.

Além das perguntas a respeito do conteúdo das fórmulas, os usuários foram questionados sobre a complexidade de leitura das fórmulas, considerando seu conteúdo e a estratégia utilizada no Access8Math-NavMatBR. A questão foi elaborada utilizando escala *Likert* de 5 pontos, onde 1 significava muito fácil e 5 muito difícil. A Figura 4.6 apresenta a mediana da dificuldade de

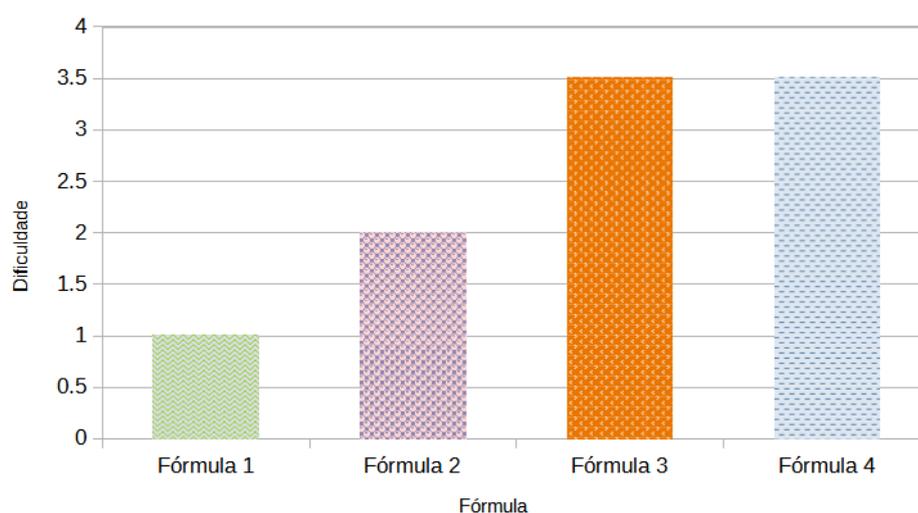
cada uma das fórmulas de acordo com os participantes. A mediana da dificuldade para interação com a fórmula 1 foi de 1 (muito fácil). A mediana de dificuldade para a fórmula 2 foi 2 (fácil), e as medianas para as fórmulas 3 e 4 foi de 3,5 (entre nem fácil nem difícil e difícil).

Tabela 4.5 – Compreensão dos usuários sobre as tarefas apresentadas utilizando o Access8Math-NavMatBR

Participante	Fórmula 1	Fórmula 2	Fórmula 3	Fórmula 4
D1	Compreendeu totalmente	Compreendeu totalmente	Compreendeu parcialmente	Compreendeu parcialmente
D2	Compreendeu totalmente	Compreendeu totalmente	Compreendeu totalmente	Compreendeu parcialmente
D3	Compreendeu totalmente	Compreendeu totalmente	Compreendeu totalmente	Compreendeu totalmente
D4	Compreendeu totalmente	Compreendeu totalmente	Compreendeu totalmente	Compreendeu totalmente
D5	Compreendeu totalmente	Compreendeu parcialmente	Não compreendeu	Compreendeu parcialmente
D6	Compreendeu totalmente	Compreendeu totalmente	Compreendeu parcialmente	Compreendeu totalmente

Fonte: Do autor (2020)

Figura 4.6 – Mediana das dificuldades das fórmulas de acordo com a classificação dos participantes do teste



Fonte: Do autor (2020)

É interessante observar que, na avaliação do ChromeVox-NavMatBR (ABREU et al., 2019), à medida que as fórmulas se tornavam mais difíceis, os usuários tinham uma compreensão menor sobre a fórmula. No estudo com o Access8Math-NavMatBR, ainda que a dificuldade

impactasse na compreensão, a única fórmula que não foi compreendida foi a Fórmula 3, tendo ocorrido a não compreensão total apenas uma vez durante os testes.

4.6 Avaliação de usabilidade do Access8Math-NavMatBR

A avaliação de usabilidade foi feita a partir da execução dos testes com usuários. Após a análise dos aspectos de compreensão das fórmulas matemáticas, seguiu-se com a identificação dos problemas de usabilidade ocorridos, comentários e sugestões dos participantes.

A partir dos testes, utilizando Análise Temática (BRAUN; CLARKE, 2006), foram identificadas 52 considerações à respeito de problemas, os quais foram agrupados nos seguintes temas: Interação com Fórmulas (22 ocorrências), Narração de Fórmulas (27 ocorrências) e Plataforma (3 ocorrências). Estes problemas foram identificados nos testes à partir dos relatos dos participantes e pela observação do pesquisador quanto ao comportamento destes.

O tema Interação com Fórmulas contempla questões envolvendo a manipulação do *plugin* e da fórmula matemática pelo usuário. Nesse tema estão presentes questões como a dificuldade de alcançar o interior de uma raiz quadrada ou de habilitar o modo de abstração, por exemplo.

O tema Narração de Fórmulas engloba pontos relacionados à forma de leitura oferecida pelo *plugin*. A exemplo disso pode-se destacar questões como a velocidade da leitura e incompreensão das palavras utilizadas para descrever um determinado elemento.

No tema Plataforma tem-se questões relacionadas a sugestões de disponibilização do *plugin* para ambientes e software Desktop, como Microsoft Office Word.

Os temas que emergiram resultaram do mapeamento entre as categorias atribuídas na análise aberta dos testes. A partir dessa categorização, foram identificadas 25 categorias que serão discutidos no decorrer dessa Seção.

4.6.1 Interação com Fórmulas

Ao todo, foram encontrados 22 problemas a respeito da Interação com as fórmulas, agrupados em 12 categorias, conforme demonstra a Tabela 4.6.

A seguir são descritas cada uma das categorias de problemas observados nos testes.

Tabela 4.6 – Relação das categorias dos problemas sobre Interação com a Fórmula por quantidade de ocorrências

Categoria	Ocorrências	Severidade
Dificuldade para acionar o modelo de expansão em fórmula reduzida	1	Grave
Dificuldade para compreender que um elemento complexo pode ter outros elementos complexos dentro	4	Grave
Funcionamento das teclas de atalho para exploração não é claro	3	Grave
Dificuldade para compreender a abstração da fórmula em componentes mais gerais	2	Simples
Dificuldade para compreender como aumentar ou diminuir o nível de abstração (zoom)	1	Simples
Dificuldade para identificar atributo de elemento de raiz	1	Simples
Dificuldade para identificar elemento específico na descrição detalhada de elemento dentro de fração	1	Simples
Dificuldade para sair da leitura de expansão de trecho de fórmula	1	Simples
Sistema não permite personalizar as teclas para exploração contextual	1	Simples
Usuário não compreendeu que poderia explorar o conteúdo do elemento abstrato "fração"	1	Simples
Usuário não compreendeu que poderia explorar o conteúdo do elemento abstrato "raiz"	5	Simples
Dificuldade para entender qual é o nível de abstração atual (zoom)	1	Cosmético

Fonte: Do autor (2020)

4.6.1.1 Dificuldade para acionar o modelo de expansão em fórmula reduzida

Ao realizar a leitura da primeira fórmula com o modo de abstração ativado, o participante D1 ficou confuso quanto a leitura. Ao ser perguntado qual o numerador da fração presente na Fórmula 1, o participante afirmou não conseguir identificar o conteúdo da fração. Por tratar-se de um problema que poderia impactar completamente a realização do teste, foi feita uma interferência a fim de lembrar o participante que o conteúdo da fração seria apresentado a partir da exploração da fórmula, ao entrar no modo de interação.

4.6.1.2 Dificuldade para compreender que um elemento complexo pode ter outros elementos complexos dentro

Esta categoria foi extraída de quatro ocorrências envolvendo os participantes D1, D5 e D6. Ao realizarem a leitura dos elementos matemáticos e se depararem com as frações presentes nas fórmulas 3 e 4, os participantes não conseguiram compreender que seria possível haver

novas expressões matemáticas e elementos complexos dentro de um outro elemento complexo, desse modo em alguns momentos a exploração interna para buscar os sub-elementos não foi realizada.

4.6.1.3 Funcionamento das teclas de atalho para exploração não é claro

Foram identificados 3 considerações envolvendo problemas na compreensão das teclas de atalho para exploração, todas obtidas através do teste com o participante D1. A primeira consideração foi quanto à Fórmula 3, na qual, ao realizar a exploração na fração presente na fórmula, o participante em questão achou que ao pressionar a tecla seta para baixo iria realizar um salto do denominador para o numerador. Já na fórmula 4, objetivando realizar a leitura dos elementos dentro da fração, o participante tentou utilizar as setas direcionais esquerda e direita para navegar entre os elementos da fração sem antes tê-la expandido para acessar seu conteúdo. Ainda na fórmula 4, o participante tentou dar zoom na fórmula e expandir a fração utilizando a seta para cima.

4.6.1.4 Dificuldade para compreender a abstração da fórmula em componentes mais gerais

Após realizar a entrada no modo de interação, o participante D1 ficou confuso sobre como realizar a leitura detalhada da fração na fórmula 1. A seguir é incluído um relato do participante D1 quanto ao problema.

"... quando você começa a leitura fica um pouco confuso, ... ele [Leitor de telas] fala '*três menos fração*', aí eu pensei: cadê o denominador da fração?"

O problema de dificuldade para compreender a abstração da fórmula em componentes mais gerais também ocorreu com o participante D2, onde foi feita a leitura da Fórmula 3 diversas vezes até que foi realizada a exploração interna da fórmula em busca dos detalhes dos elementos.

4.6.1.5 Dificuldade para compreender como aumentar ou diminuir o nível de abstração (zoom)

Durante a leitura da Fórmula 3, o participante D1 tentou realizar a navegação entre os elementos que compunham o denominador da fórmula utilizando a seta para baixo. O correto seria utilizar as setas para esquerda e direita, uma vez que as setas para cima e para baixo são

usadas para a entrada e saída nos detalhes dos elementos complexos. A seguir é incluído um relato do participante quanto ao problema evidenciado.

"quando você dá o zoom no denominador, ele [Leitor de telas] fala para mim 'oito' e depois fala que não move porquê não consegue ler a raiz que tem, ... estou pressionando seta para baixo"

4.6.1.6 Dificuldade para identificar atributo de elemento de raiz

Para identificar os atributos da raiz, como conteúdo e grau, era esperado que os participantes expandissem a raiz e entrasse em seus detalhes. Entretanto, o usuário D1 não realizou este processo.

4.6.1.7 Dificuldade para identificar elemento específico na descrição detalhada de elemento dentro de fração

Assim como no problema anterior, para identificar os detalhes de um elemento complexo interno a um outro elemento complexo, era necessário que fosse feita a expansão do elemento desejado. Entretanto, ao fazer a leitura da fórmula 3 o participante D1 não navegou internamente nos elementos do numerador para identificar o conteúdo da raiz presente nesse nível.

4.6.1.8 Dificuldade para sair da leitura de expansão de trecho de fórmula

No Leitor de telas NVDA, os usuários costumam utilizar a combinação de teclas insert+espaço para habilitar e desabilitar o modo de edição. Ao entrar no modo de interação na Fórmula 1, o participante D1 questionou se seria possível sair utilizando as teclas mencionadas.

4.6.1.9 Sistema não permite personalizar as teclas para exploração contextual

Para a utilização do modo de abstração implementado neste projeto, foi estabelecido como conjunto de teclas de atalho a combinação CTRL+ALT+A para a habilitação e desabilitação do modo. Entretanto essas teclas podem sobrescrever a definição de alguma outra funcionalidade já em uso no NVDA.

4.6.1.10 Usuário não compreendeu que poderia explorar o conteúdo do elemento abstrato “fração”

Na leitura da Fórmula 3 o participante D1 se deparou com uma fração e foi questionado se haveria algum expoente na fórmula. O participante afirmou que não, entretanto não realizou a expansão da fração para identificar se seu conteúdo continha ou não a informação solicitada.

4.6.1.11 Usuário não compreendeu que poderia explorar o conteúdo do elemento abstrato “raiz”

Ao realizar a leitura do elemento complexo raiz, os participantes D1, D3 e D5 tiveram problemas para identificar seu conteúdo, por não se recordarem que era possível explorar a fórmula navegando até o interior desses elementos.

4.6.1.12 Dificuldade para entender qual é o nível de abstração atual (zoom)

Ao final do teste o participante D2 sugeriu que fossem incluídas informações a respeito do nível atual da exploração interna da fórmula. De acordo com o participante, essa informação seria útil para auxiliar em sua localização dentro da fórmula.

"eu percebi que nos primeiro teste eu senti a necessidade da informação dos 'degraus'[níveis], nos últimos [testes] eu acho que já fui um pouco mais intuitivo navegando, ... ainda assim acho que pode ser necessário [informação dos níveis], acho que isso vai virar um ponto de referência"

4.6.2 Narração de Fórmulas

Foram identificadas 27 observações a respeito da narração, agrupadas em 13 categorias diferentes. A Tabela 4.7 apresenta as categorias e suas respectivas ocorrências.

A seguir são descritas as principais categorias de problemas envolvendo a narração observados nos testes.

4.6.2.1 Dificuldade para compreender narração de índice de raiz

Pelo fato de o índice da raiz poder assumir qualquer valor do conjunto dos números naturais, ao criar a descrição do índice foi necessário optar por uma forma que fosse genérica o suficiente para ser capaz de cobrir a grande variedade de valores que o índice pudesse assumir. Desse modo, foi decidido utilizar "raiz à X" como narração, sendo X o grau da raiz. Entretanto,

Tabela 4.7 – Relação das categorias das considerações sobre a Narração da Fórmula por quantidade de ocorrências

Categoria	Ocorrências	Severidade
Dificuldade para compreender narração de índice de raiz	5	Grave
Leitura de lista de elementos com enumeração pode confundir usuários	2	Grave
Leitura do numerador e denominador de fração sem pausa entre os dois dificulta o entendimento	1	Grave
Narração de raiz é confusa para o usuário	1	Grave
Narração de um elemento por vez leva usuário a crer que não há mais elementos	3	Grave
Dificuldade para compreender "negativo" como "sinal de menos"	1	Simples
Dificuldade para compreender estrutura de fração pela leitura	2	Simples
Dificuldade para compreender leitura de expoente em exponenciação	4	Simples
Dificuldade para compreender narração devido a diferentes padrões utilizados pelos professores	1	Simples
Inconsistência na leitura e anúncio de entrada no interior de elementos	1	Simples
Dificuldade em distinguir o que é divisão e o que é fração	4	Simples
Narração da fórmula foi difícil de compreender	1	Simples
Narração padrão é muito rápida	1	Simples

Fonte: Do autor (2020)

pela diferença entre padrão utilizado pelo Access8Math-NavMatBR e o utilizando pelos participantes, os participantes D2, D3 e D5 tiveram problemas em reconhecer a leitura do índice da raiz.

4.6.2.2 Leitura de lista de elementos com enumeração pode confundir usuários

Ao entrar no modo de interação e realizar a exploração dos elementos da fórmula utilizando as setas direcionais, o leitor de telas enumera cada um dos elementos que estão sendo lidos visando auxiliar a localização do usuário quanto à leitura. Desse modo, supondo que o primeiro elemento da fórmula seja 5, o Leitor de Telas narraria: "item 1 ... 5". No entanto, os participantes D4 e D5 assinalaram que esta enumeração, por ser feita utilizando um número, pode gerar uma certa confusão sobre o que é índice e o que é elemento da fórmula. Já o participante D2 afirmou ter gostado da enumeração.

4.6.2.3 Leitura do numerador e denominador de fração sem pausa entre os dois dificulta o entendimento

De acordo com o participante D2, a pausa entre a narração do numerador e denominador de uma fração não está satisfatória.

4.6.2.4 Narração de raiz é confusa para o usuário

Na leitura da fórmula 3, o Participante D6 entendeu que o conteúdo da raiz do numerador fosse a letra grega Pi, entretanto este símbolo estava localizado externamente à raiz. Foi observado, porém, que o participante não realizou a expansão da raiz para verificar seu conteúdo.

4.6.2.5 Narração de um elemento por vez leva usuário a crer que não há mais elementos

Em alguns momentos os usuários D4 e D5 não realizaram a leitura completa dos elementos complexos, imaginando ter apenas um elemento interno ao elemento complexo fizeram a leitura apenas do primeiro termo.

4.6.2.6 Dificuldade para compreender “negativo” como “sinal de menos”

Tratando-se de números negativos, a narração dos elementos foi feita na forma "negativo X", onde X é o elemento negativado. Essa forma de leitura gerou dúvida no usuário D6, porém foi um ponto de elogio pelo usuário D2.

4.6.2.7 Dificuldade para compreender estrutura de fração pela leitura

Ao realizar a leitura da fórmula 4, o participante D5 teve dificuldade para identificar a primeira fração dentro do numerador. A dificuldade se deu devido ao fato de a narração ser feita da seguinte forma: "fração com numerador ... dividido por fração ...". O fato de se ler uma fração dentro da fração externa, fez com que o participante imaginasse já ter saído da fração externa e se perder quanto à localização na fórmula.

Além disso, o participante D4 questionou o fato de frações simples não apresentarem a narração: "numerador... denominador...", mas narrar diretamente: "1 sobre 2", por exemplo. De acordo com ele, manter o padrão para esses casos pode facilitar a compreensão.

4.6.2.8 Dificuldade para compreender leitura de expoente em exponenciação

Em quatro ocasiões o participante D5 teve problemas para identificar o expoente na fórmula. Entretanto, o participante afirmou não ter conhecimento do que é um expoente, e que era essa a razão de não conseguir identificar este tipo de elemento. Esse problema não foi constatado nos testes dos demais participantes.

4.6.2.9 Dificuldade para compreender narração devido a diferentes padrões utilizados pelos professores

O participante D2 afirmou que, pelo fato de não haver uma padronização na forma com que a matemática é narrada - até mesmo entre os professores - este seria um problema que possivelmente os usuários se deparariam.

4.6.2.10 Inconsistência na leitura e anúncio de entrada no interior de elementos

Foi adotado na implementação do *plugin* que, ao se deparar com uma raiz contendo apenas um elemento em seu interior, ao expandir a raiz seria feita a narração: "raiz de X", onde X é o conteúdo da raiz. Por outro lado, ao realizar a leitura de raízes que possuam vários elementos em seu interior, ao realizar a expansão da raiz a narração iniciaria com a informação "interior da raiz". O participante D4 questionou a falta de padrão na leitura.

4.6.2.11 Dificuldade em distinguir o que é divisão e o que é fração

Foi convencionado que a narração de frações, de forma abstrata, seria feita através da expressão "fração". Entretanto, em algumas fórmulas utilizadas tinham divisões que não se caracterizavam como frações. O operador de divisão foi convencionado a ser narrado como: "dividido por". Os participantes D2, D5 e D6 tiveram dúvidas a respeito dessa leitura, nos pontos onde haviam o símbolo de divisão, os participantes acreditavam que a composição dos elementos se tratava de uma fração.

4.6.2.12 Narração da fórmula foi difícil de compreender

Ao realizar a leitura da Fórmula 4, o participante D6 afirmou ter ficado confuso com a fórmula, por ter vários elementos e vários níveis de navegação. Entretanto, não soube dizer exatamente o ponto que gerou a confusão.

4.6.2.13 Narração padrão é muito rápida

Ao expandir um elemento complexo, é feita uma leitura linear e sequencial de seus elementos, sem que haja interação do usuário. Foi identificado que o participante D5 começou a realizar a leitura por caracteres, disponível nativamente no NVDA, para fazer a leitura de forma pausada.

4.6.3 Plataforma

No decorrer dos testes foram obtidas três observações a respeito da plataforma alvo da solução proposta neste trabalho. Os participantes D3 e D4 questionaram se, além de possibilitar a leitura de fórmulas matemáticas na Web, seria possível criar *plugins* que fossem capazes de fazer leitura em ferramentas de edição de texto como o *Microsoft Office Word*.

Além disso, o participante D3 questionou se qualquer tipo de fórmula disponibilizada na Web poderia ser lida utilizando o Access8Math-NavMatBR. Neste ponto foi esclarecido que o *plugin* só oferece suporte para fórmulas estruturadas com a linguagem de marcação MathML. Tendo isso em mente, o participante sugeriu que além da implementação do *plugin* fosse feito um movimento para difundir a forma correta de se criar conteúdo matemático utilizando essa linguagem de marcação.

4.6.4 Considerações Gerais

Foram obtidas oito considerações gerais a respeito da utilização do *plugin* Access8Math-NavMatBR, sendo duas sugestões e seis pontuações positivas a respeito da abordagem proposta e da utilização do *plugin*.

O participante D2 sugeriu que, juntamente a disponibilização do *plugin* instalável, fosse também disponibilizado um material de apoio contendo a forma com que cada elemento matemático é lido e também como é feita a dinâmica de exploração da estratégia utilizada. A respeito disso foi feita a seguinte declaração:

"seria muito legal isso [a criação do material de apoio] ... se torna até uma parte pedagógica do *plugin*. Em vez de só desenvolver e deixar que o usuário compreenda por inteiro [como é feita a exploração e leitura], ou que ele precise sempre de orientação ou de alguém junto [no momento de utilização do *plugin*]"

Por sua vez, o participante D5 sugeriu que fosse utilizada a descrição dos símbolos matemáticos disponibilizada nativamente pelo NVDA.

Outra consideração interessante foi feita pelo participante D1, que relacionou a forma de exploração contextual implementada à forma de exploração comumente utilizada por deficientes visuais em tabelas do Excel. De acordo com o participante, o fato de, por exemplo, ter que encontrar o denominador de uma fração para então ser capaz de explorar seu conteúdo se assemelha a navegação em matrizes do Excel onde, para se ler o conteúdo de uma determinada coluna, é comum navegar primeiro até seu cabeçalho para se localizar a respeito do que se trata o conteúdo da coluna que está sendo lida.

Além das considerações apresentadas, os participantes demonstraram satisfação ao utilizar o *plugin* para realizar a leitura. Quanto a isso, foram feitas as seguintes declarações:

"... a partir deste teste de hoje eu sairia lendo as equações tudo, todas as fórmulas que eu quisesse eu teria condições [de ler] ..." *Participante D2*

"... é uma novidade incrível [o *plugin*], um sistema que tem uma proposta muito interessante porquê é uma necessidade nossa fazer a leitura digital de fórmulas matemáticas, e o leitor [de telas] não interpreta isso ainda ..." *Participante D4*

"... poder realizar a expansão dos elementos, dar zoom, é muito interessante, principalmente porquê vocês conseguiram deixar a leitura linear ..." *Participante D4*

"... achei fantástico o sistema, a gente vê uma carência muito grande na questão da matemática pra utilização com leitor de telas e a proposta [do *plugin*] é muito boa ..." *Participante D5*

"... foi tranquilo [a leitura] ... desmembrando cada parte da fórmula, eu achei que ficou bom [de realizar a leitura] ..." *Participante D6*

Além dessas declarações, de acordo com o participante D6, a forma com que foi feita a leitura reduziu a sobrecarga de memória e possibilitou uma habituação da forma de leitura. Este fato foi evidenciado nos testes onde, por diversas vezes, ao serem questionados sobre o conteúdo de algum trecho específico da fórmula os participantes não precisavam retornar até o trecho em questão para lembrar seu conteúdo.

Além disso, no decorrer da utilização do *plugin*, foi verificado que os participantes começavam a se sentir mais confortáveis em utilizar o sistema. A respeito disso, o usuário D2 afirmou:

"... o usuário vai se apropriando da linguagem, da escuta, do processamento, ... por mais que eu tenha uma certa experiência com a matemática, é uma outra forma de leitura. Então tem também o processo do usuário se adequar ... o usuário se acostuma [com a utilização do sistema]"

Durante os testes surgiu um relato bastante importante feito pelo participante D2, no qual o mesmo afirmou ter sido prejudicado num concurso justamente devido ao problema de ambiguidade na leitura de fórmulas matemáticas. A seguir temos a transcrição desse trecho do diálogo:

"... em 2019 abriu um concurso pra uma Universidade Federal, para revisor de texto braille ... era justamente para adaptação de material em braille ... dentre o que era necessário conhecimento, era conhecimento de adaptação de matemática, química e português ... era um assunto que eu dominava ... quando chegou no momento da prova, eu passei em primeiro lugar na prova teórica, e na prova prática houve a situação em que a gente tinha que adaptar uma equação que estava na tela do computador ... e a pessoa tinha que escrever no braille de forma linear ... pra quem não enxerga tinha o ledor e também no computador a fórmula adaptada no formato digital para a leitura no NVDA ... nessas fórmulas da matemática eu tive muitas ambiguidades, diversas formas de interpretação que eu não conseguia saber o que estava dentro de quê, onde acabava uma fração e onde não acabava, se uma soma estava no numerador ou se já estava fora da fração ... eu tive diversas situações onde recorri ao ledor para perguntar ... eu não tinha como fazer essa distinção, não tinha nenhum agrupamento ou qualquer coisa que me informava ... e a pessoa sempre me dizia que o que podia fazer era somente ler ... eu não conseguia interpretar a fração que foi descrita tanto na tela, quanto pela pessoa que lia ... por um detalhe eu não passei nessa prova ... a prova estava impossível de entender."

Após isso ele fez a seguinte declaração:

"... é por causa desse tipo de situação que eu vejo o valor e o potencial de um trabalho tão bem feito quanto está esse aqui, de leitura de equação matemática, você pode definir a vida de alguém. Acessibilidade não é simplesmente falar que o cego conseguiu ler. Acessibilidade é garantir que alguém passe num concurso ... é garantir que a pessoa utilize o que ela conheceu, o que ela estudou, o que ela adquiriu na vida para passar as vezes numa oportunidade que era a chance dela. Então, acessibilidade não é brincadeira."

As declarações feitas pelo participante D2 demonstram a necessidade e importância de se ter um sistema que seja capaz de mitigar problemas como ambiguidade, e o tamanho do impacto gerado por esse tipo de problema.

Além da declaração do participante D2, outro relato importante foi feito pelo participante D3. De acordo com o que foi relatado, o participante possui graduação em matemática e exercia a profissão até o momento em que perdeu a visão, após isso optou por abandonar a carreira como professor de matemática.

Ao final da aplicação dos testes e do questionário SUS, foram feitas algumas perguntas a respeito da percepção geral dos usuários quanto à estratégia de exploração, teclas de atalho e até mesmo quanto a percepção dos usuários sobre a sua própria compreensão das fórmulas.

Quanto à utilização das teclas padrão do NVDA, foi questionado se elas facilitaram o uso do sistema e, confirmando o que já era esperado pelos autores, todos os participantes responderam que sim.

À respeito da inserção da nova tecla de atalho para a habilitação/desabilitação da exploração contextual, os participantes foram questionados se as teclas foram de difícil memorização. Todos responderam negativamente, afirmando que as teclas era fáceis de serem memorizadas.

Foram feitas ainda outras 2 questões a respeito da compreensão das fórmulas:

- A navegação abstrata possibilitou a redução da ambiguidade na leitura da fórmula?
- A navegação abstrata melhorou a compreensão da fórmula?

As questões foram apresentadas aos usuários utilizando escala *Likert* de 5 pontos, onde 1 significa discordo totalmente e 5 significa concordo totalmente. A mediana das respostas obtidas são demonstradas na Tabela 4.8, e apresentam valores bastante satisfatórios.

Tabela 4.8 – Mediana das respostas das perguntas gerais sobre a compreensão das fórmulas

Pergunta	Mediana
A navegação abstrata possibilitou a redução da ambiguidade na leitura da fórmula?	4,5
A navegação abstrata melhorou a compreensão da fórmula?	5

Fonte: Do autor (2020)

4.6.5 Sugestões de melhorias

A partir dos testes, conforme apontado nas seções anteriores, foram obtidos oito problemas considerados graves, sendo cinco relacionados à narração e três à interação. A seguir são apresentadas sugestões de possíveis melhorias a serem desenvolvidas no futuro do projeto.

4.6.5.1 Dificuldade para acionar o modelo de expansão em fórmula reduzida

Conforme já descrito, a dificuldade dos participante residiram no fato de não se recordar que era possível explorar internamente as fórmulas e como realizar essa exploração. Os autores do projeto entendem que este tipo de problema se dá por uma falta de habituação com o sistema. Uma forma de melhoria que poderia ser implantada é a elaboração de uma documentação que contemple a explicação sobre o funcionamento da exploração e peculiaridades de leitura.

Além disso, outra estratégia que poderia ser aplicada é a adotada por Edwards, McCartney e Fogarolo (2006), com a criação de treinamentos para professores e usuários sobre o uso da ferramenta.

Também se incluem nessa sugestão de melhoria as categorias de problema:

- dificuldade para compreender que um elemento complexo pode ter outros elementos complexos dentro e
- funcionamento das teclas de atalho para exploração não é claro.

4.6.5.2 Dificuldade para compreender narração de índice de raiz

Os problemas envolvendo a narração do índice da raiz se deram pela escolha das palavras para a narração deste elemento. Atualmente está sendo feito um estudo paralelo por um estudante do curso de Licenciatura em Matemática, com o objetivo de identificar as melhores formas de se realizar a narração de alguns elementos matemáticos específicos.

Além disso, conforme apontou o participante D2, não existe uma forma padrão de narração para cada elemento matemático. Atualmente está sendo desenvolvido um projeto que tem como objetivo a identificação de padrões recorrentes de narração (LIMA et al., 2019). Uma vez que os padrões sejam identificados, poderia ser realizada a elaboração de uma forma única de narração e, deste modo, realizar a sua difusão. A definição de um padrão não somente facilitaria a criação de ferramentas para leitura matemática, como auxiliaria os próprios professores sobre como realizar a narração de fórmulas matemáticas da melhor forma possível.

4.6.5.3 Leitura de lista de elementos com enumeração pode confundir usuários

Dois participantes apontaram que a enumeração dos termos de uma fórmula poderia atrapalhar a compreensão do conteúdo matemático. Em contrapartida, um dos participantes afirmou que a enumeração o auxiliou na localização interna da fórmula e ainda sugeriu que essa enumeração ocorresse não somente sobre os termos mas sobre os níveis de exploração interna da fórmula.

Devido às visões controversas, uma possível solução seria dar ao usuário a opção de habilitar/desabilitar a enumeração, e ainda fornecer novas formas de enumeração utilizando letras ou ainda números ordinais.

4.6.5.4 Leitura do numerador e denominador de fração sem pausa entre os dois dificulta o entendimento

Como solução para este problema poderíamos testar múltiplas configurações de velocidade de leitura e pausa entre a narração dos termos a fim de chegar em números próximos do ideal. Além de possibilitar ao usuário aumentar ou reduzir o tempo de pausa e velocidade de leitura.

4.6.5.5 Narração de um elemento por vez leva usuário a crer que não há mais elementos

Ambos problemas ocorreram devido a ausência de visibilidade do que existe dentro dos elementos complexos, como solução para estes problemas poderia ser modificada a narração destes elementos para, além de informar o tipo a que o termo se trata, informar a quantidade de elementos que existem dentro dele. Deste modo, ao se deparar com a raiz da fórmula de Bhaskara ($\sqrt{b^2 - 4ac}$), seria narrado "raiz quadrada com 4 termos internos". Essa solução nos possibilitaria apresentar ao usuário duas versões de narração, uma curta contendo a narração feita atualmente, e uma detalhada contendo a quantidade de termos em seu interior.

Os autores entendem que essa sugestão de melhoria também poderia ser aplicada à categoria de problema "narração de raiz é confusa para o usuário".

4.7 Satisfação dos Usuários com o Access8Math-NavMatBR

Como forma de medir o grau de satisfação dos participantes quanto a usabilidade do sistema, foi aplicado um questionário SUS (BROOKE et al., 1996) ao final de cada um dos testes. As respostas do questionário foram baseadas em escala *Likert* variando entre 1 e 5, onde 1 se refere à "Discordo totalmente" e 5 à "Concordo totalmente". A Tabela 4.9 apresenta a mediana de cada uma das respostas coletadas pelo SUS.

Aplicando a fórmula de cálculo de *score* proposta por Brooke et al. (1996), na qual a pontuação varia entre 0 (muito ruim) e 100 (muito bom) a pontuação média obtida pelos participantes foi de 79,58. A pontuação obtida pelo Access8Math-NavMatBR indica ao menos uma evolução da usabilidade quando comparada a média das pontuações do ChromeVox-NavMatBR (ABREU et al., 2019), 60. De acordo com Sauro e Lewis (2016), a pontuação obtida pelo Access8Math-NavMatBR o classifica como um sistema de Conceito A- de usabilidade. Enquanto que a pontuação obtida no ChromeVox-NavMatBR apresenta Conceito C. A Figura 4.7

apresenta a pontuação no SUS para o projeto Access8Math-NavMatBR de cada um dos participantes.

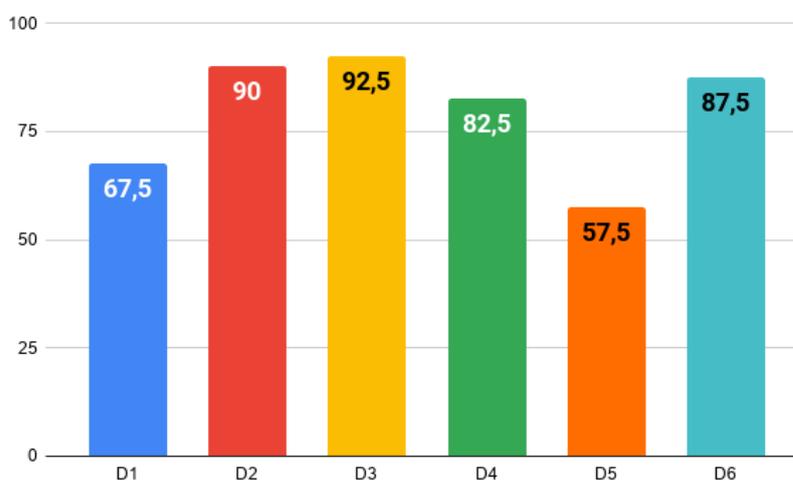
Outro ponto interessante de ser levantado é que todos os testes foram realizados remotamente e, portanto, cada um dos participantes era responsável por preparar o próprio ambiente de testes realizando a instalação do *plugin* Access8Math-NavMatBR no NVDA. Ao contrário do que se esperava, nenhum dos participantes precisou de auxílio na instalação e habilitação do *plugin*, o que se caracteriza como um ponto negativo uma vez que demonstra a facilidade de instalação do sistema.

Tabela 4.9 – Mediana das respostas do questionário SUS

Pergunta	Mediana
Eu acho que gostaria de usar esse sistema	5
Eu achei o sistema desnecessariamente complexo	2
Eu achei o sistema fácil de ser utilizado	4
Eu acho que precisaria de ajuda de uma pessoa com conhecimentos técnicos para usar o sistema	2
Eu acho que as várias funções do sistema foram bem integradas	5
Eu acho que existem várias inconsistências nesse sistema	1,5
Eu acredito que a maioria das pessoas poderiam aprender a utilizar esse sistema muito rapidamente	4
Eu achei o sistema muito difícil de usar	1
Eu me senti muito confiante usando o sistema	4
Eu precisei aprender muitas coisas antes que eu pudesse utilizar o sistema	2

Fonte: do autor (2020)

Figura 4.7 – Pontuação SUS de cada participante do teste



Fonte: Do autor (2020)

4.8 Discussão e Implicações

O objetivo deste projeto foi de implementar e avaliar um protótipo de sistema para exploração de fórmulas matemáticas em português para pessoas com deficiência visual, com recursos para exploração de fórmulas com abstração em diferentes níveis. Para isso, o projeto envolveu a realização de entrevistas com pessoas com deficiência visual, a fim de levantar as principais dificuldades desse grupo de pessoas quanto a leitura matemática utilizando Leitor de Telas. A partir da análise das entrevistas foi verificado que dois dos grandes problemas estavam localizado na ambiguidade da transmissão do conteúdo matemático e na sobrecarga de memória ocasionada pela transmissão desse conteúdo.

Além das análises sobre as entrevistas, foram feitas análises dos testes de usabilidade envolvendo a implementação do *plugin* ChromeVox-NavMatBR (ABREU et al., 2019), que estava em finalização e avaliação pelo grupo de pesquisa no início do projeto de mestrado do autor desta dissertação, e contou com sua colaboração. Com as análises, foi possível verificar novamente problemas envolvendo a ambiguidade na leitura das fórmulas, e explorar implicações para o design de recursos para explorar e navegar por elementos internos de fórmulas matemáticas.

Um ponto interessante da abordagem adotada pelo ChromeVox-NavMatBR (ABREU et al., 2019) foi o mapeamento direto de teclas de atalho para estruturas específicas da matemática como raiz, somatório e fração. Esta característica demonstrou proporcionar ao usuário uma maior velocidade no acesso aos elementos. Entretanto, a realização da cobertura de todas as estruturas matemáticas se tornaria inviável, seja pela dificuldade do mapeamento de todas as estruturas matemáticas para teclas de atalho, seja pela sobrecarga de memória do usuário por ter de memorizar todas as combinações de teclas, conforme demonstra em caso similar o trabalho de Stevens, Edwards e Harling (1997). A utilização do ChromeVox como base para as implementações também era um limitante para a utilização por pessoas com deficiência visual. O ChromeVox só pode ser utilizado dentro do navegador Google Chrome. Isto faria com que usuários com deficiência visual tivessem que alternar entre dois leitores de tela, o que poderia causar sobrecarga. Até o momento do início das implementações, entretanto, o ChromeVox era o único leitor de telas com código aberto que permitiria efetuar as implementações para avaliação.

A partir da observação destes problemas, foi realizada a implementação de um novo *plugin*, Access8Math-NavMatBR, dessa vez tendo como foco a utilização do NVDA como Leitor

de Telas base. Em 2018, o *Access8Math* para leitura de fórmulas matemáticas foi publicado por Tseng (2018), e teve código-fonte disponibilizado para a comunidade. Com a implementação e testes do novo *plugin*, foi possível verificar um avanço na resolução do problema de ambiguidade na leitura, graças à abordagem de abstração de conteúdos complexos, que não estava presente na implementação anterior.

Além da melhoria na compreensão, foi possível observar que a aplicação da abstração de conteúdos complexos auxiliou ainda na possibilidade de redução da sobrecarga de memória, uma vez que as informações transmitidas aos usuários são feitas na forma de *chunks* delimitados contextualmente pelo elementos estruturais matemáticos que estão sendo explorados no momento. Ainda sobre a sobrecarga de memória, de acordo com o que foi obtido por Stevens, Edwards e Harling (1997), um ponto importante de ser observado é quanto às teclas de atalho disponibilizadas aos usuários. De acordo com os resultados daquele autor, um grande número de teclas de atalho não necessariamente refletem numa melhor usabilidade, uma vez que os usuários precisam memorizar essas teclas e, conseqüentemente, acabam se prejudicando quanto à sobrecarga de memória.

O problema com o excesso de teclas de atalho fato pode ser verificado por meio dos testes com o ChromeVox-NavMatBR (ABREU et al., 2019), nos quais os usuários não conseguiam memorizar as teclas de atalho implementadas (uma para cada tipo de elemento matemático). Tendo isso em mente, o Access8Math-NavMatBR se propôs a apoiar-se principalmente na utilização das teclas padrão do NVDA, tendo implementado somente uma nova combinação de teclas - referente à habilitação da leitura abstrata. De acordo com o que foi observado nos testes e assinalado pelos participantes, a utilização das teclas padrão do leitor de telas na exploração das fórmulas facilitou a memorização e compreensão por parte dos usuários.

Os avanços obtidos são importantes para direcionar novos estudos relacionados a manipulação de fórmulas matemáticas utilizando exploração contextual sobre elementos estruturais e abstração de elementos complexos. Essa abordagem, apresentada inicialmente por Stevens, Edwards e Harling (1997), ficou por muito tempo sem ser objeto de pesquisa de novos estudos a respeito de sua eficácia. Entretanto, trabalhos recentes como o de Fajardo-Flores e Archambault (2014), avaliado por professores com e sem deficiência visual, feito para o inglês, tem voltado a discutir sobre a utilização da abstração de conteúdos complexos e exploração contextual. Ressalta-se que não haviam sido encontrados estudos com a aplicação desta abordagem com o Português do Brasil. Os resultados obtidos pelo Access8Math-NavMatBR representam

evidências de que é possível estabelecer melhorias na compreensão de fórmulas matemáticas utilizando essa abordagem, sobretudo no que diz respeito a leitura utilizando o idioma português no cenário brasileiro.

Além do trabalho de Fajardo-Flores e Archambault (2014), Cervone, Krautzberger e Sorge (2016) e Gulley et al. (2017) também propuseram sistemas utilizando a exploração contextual. Entretanto, na abordagem de Cervone, Krautzberger e Sorge (2016) não foram feitos testes empíricos ou avaliações que verificassem sua eficácia. Já Gulley et al. (2017) apresentou apenas a ideia geral de como realizar a leitura matemática para pessoas com deficiência visual, não apresentando até o momento da escrita deste trabalho o desenvolvimento de um sistema de software que reunisse suas ideias.

Soiffer (2015) também utilizou a estratégia de exploração contextual na versão 4 de seu sistema MathPlayer. Entretanto, em relação à leitura matemática na Web, o *plugin* só é capaz de fazer leitura no Internet Explorer e Mozilla Firefox. O *plugin* Access8Math-NavMatBR também é capaz de realizar a leitura nestes *browsers*. Além disso, também oferece a capacidade de utilizar o Google Chrome. Outro ponto importante de ser destacado são os idiomas abordados pelos dois *plugins*. De acordo com a documentação atual do MathPlayer¹, o *plugin* possui suporte à 15 idiomas diferentes, entretanto o português, que é o foco deste trabalho, ainda não é suportado. Além disso, diferente do MathPlayer, o Access8Math (TSENG, 2018) possui código aberto, o que favorece tanto evoluções futuras pela comunidade, quanto pesquisas utilizando do código desenvolvido.

Além dos resultados práticos obtidos a partir dos testes utilizando o *addon* Access8Math-NavMatBR, as entrevistas e relatos nos testes mostraram que, mesmo com o avanço nas pesquisas sobre recursos de Tecnologia Assistiva, ainda há pouca utilização de software leitor de telas no Brasil para leitura de fórmulas matemáticas. Os relatos obtidos nos testes e entrevistas demonstram ainda a dificuldade no ensino e aprendizagem da matemática, causados muitas vezes pela falta de ferramentas educacionais para este fim. Por essa razão, os autores deste projeto acreditam que o sistema aqui apresentado pode ser bastante útil para professores e alunos. Além disso, ele pode ser útil na comunidade científica por se tratar de um software de código aberto com foco na narração no idioma português do Brasil.

Reiterando o que foi observado nas entrevistas, os testes demonstraram ainda a ausência de um padrão de narração de fórmulas matemáticas. A partir das observações, parte da solução

¹ Disponível em: <https://www.dessci.com/en/products/mathplayer/tech/credits.htm>

do problema da ambiguidade parte da escolha assertiva na forma de fazer a leitura dos elementos matemáticos, de modo que foi sugerido pelos participantes tanto a criação de um material de apoio sobre o padrão de leitura estabelecido pelo *plugin* Access8Math-NavMatBR, quanto a definição de um padrão de escrita de fórmulas. Os resultados do estudo anterior realizado com professores que trabalharam com estudantes com deficiência visual (LIMA et al., 2019) mostraram que, de fato, não há padronização na forma como professores narram esse tipo de conteúdo. Desta forma, os resultados do presente trabalho confirmam a necessidade de aprofundamento em estudos no âmbito da área de Educação Matemática para melhor entendimento sobre como narrar fórmulas matemáticas verbalmente em Português do Brasil para pessoas com deficiência visual.

É importante ressaltar que, no decorrer do desenvolvimento do projeto surgiram algumas limitações que precisaram ser contornadas para o alcance dos resultados aqui apresentados. Uma dessas limitações foi a pandemia do novo Coronavírus (Covid-19), que fez com que o planejamento dos testes tivesse de ser totalmente modificado. A exemplo disto, os testes que antes seriam realizados em um ambiente totalmente preparado para isso, foram feitos remotamente no computador do próprio participante. Devido a isso, não foi possível a realização de testes com pessoas com menor experiência com leitores de tela, que teriam dificuldades para fazer a instalação. Por essa razão o perfil de participantes foi de pessoas com grande familiaridade com o leitor de telas NVDA.

Apesar de cada participante precisar instalar o sistema no próprio computador para a realização dos testes, houve vantagens com a possibilidade de utilização do leitor com as suas próprias preferências de leitura, como velocidade e voz. Desse modo, os testes puderam ser realizados num ambiente mais próximo do cenário real de utilização do usuário. Este fato possibilitou observar questões como a facilidade de instalação do *plugin*, bem como a dificuldade de compreensão da delimitação entre numerador e denominador devido à insuficiência da pausa aplicada nesta separação, aliada a velocidade do leitor de telas do próprio usuário. Além disso, devido à limitação de experiência dos participantes e disponibilidade para a realização de testes via ligação telefônica, foi possível realizar os testes com apenas seis participantes. Assim, não foi possível realizar análises quantitativas quanto aos resultados obtidos. Entretanto, apesar das limitações as quais o projeto foi submetido, os resultados aqui apresentados ainda se demonstram satisfatórios quanto ao que era esperado.

5 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

O objetivo do presente trabalho consistiu na implementação e avaliação de uma estratégia para exploração de fórmulas matemáticas na Web para pessoas com deficiência visual que utilizam leitores de tela.

Para alcançar o objetivo, o trabalho envolveu a participação na realização de entrevistas com 12 pessoas com deficiência visual, análise dos dados coletados nas entrevistas; colaboração nos testes e análise de dados de um protótipo anterior (ABREU et al., 2019) feito com cinco participantes, elaboração e implementação de um novo protótipo de exploração de fórmulas matemáticas, Access8Math-NavMatBR, utilizando a estratégia de exploração contextual baseando-se nos achados anteriores, e testes do protótipo Access8Math-NavMatBR com seis participantes.

Os resultados das entrevistas auxiliaram na identificação das fragilidades das ferramentas atualmente utilizadas para leitura de conteúdo matemático por pessoas com deficiência visual. Dentre essas fragilidades foi possível identificar problemas como a sobrecarga de memória e ambiguidade na compreensão do conteúdo lido.

Por sua vez, os resultados obtidos por intermédio dos testes do protótipo ChromeVox-NavMatBR ajudaram a identificar questões pontuais a respeito da forma de leitura, como a necessidade de especificação de "numerador" e "denominador" ao fazer a leitura de uma fração, por exemplo. Além disso, por meio dos testes realizados com o protótipo, foi possível identificar que a utilização de múltiplas teclas de atalho, apesar de agilizar a exploração da fórmula, dificulta a memorização dos usuários que, ao menos nos cenários de teste, optavam por não utilizá-las.

Já os resultados obtidos nos testes envolvendo o *plugin* Access8Math-NavMatBR mostraram que, de acordo com o que foi afirmado pelos participantes e observado nos resultados, a exploração contextual pode ser capaz de reduzir a ambiguidade de leitura pelo fato de isolar a narração da fórmula em trechos delimitados semanticamente e, como consequência desse isolamento semântico, também possibilitar a diminuição da sobrecarga de memória. Além disso, foi possível verificar, por meio dos testes, que a utilização de teclas de atalho genéricas, acompanhada da utilização das teclas padrão dos leitores, facilitaram o aprendizado e memorização pelos participantes. Sendo assim, se mostrando mais eficaz que abordagens como a implementada pelo ChromeVox-NavMatBR.

Como contribuições científicas, este trabalho apresenta um entendimento das necessidades dos usuários, resultados de implicações para o design de sistemas para leitura de fórmulas matemáticas no contexto brasileiro e considerações sobre os padrões de exploração em fórmulas matemáticas feitas por usuários ao utilizarem leitores de tela.

O trabalho também teve como contribuição tecnológica o desenvolvimento de um *plugin* capaz de realizar a leitura de fórmulas matemáticas no idioma Português do Brasil, além de sua disponibilização gratuita à comunidade, tanto para utilização quanto para a evolução e pesquisas sobre seu código e aplicações em pesquisas no contexto de Informática na Educação e Educação Matemática com aplicação de propostas para melhoria na leitura de fórmulas.

O trabalho gerou ainda produções científicas com a publicação de quatro artigos sendo eles:

1. Guedes, H. M. C.; Freire, A. P. Estratégias de Navegação em Fórmulas Matemáticas na Web para Pessoas com Deficiência Visual. In: Workshop de Teses e Dissertações - Simpósio Brasileiro de Fatores Humanos em Sistemas Computacionais (IHC), 17, 2018, Belém. Anais [...]. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Computação, 2018 . ISSN 2177-9384. DOI: <https://doi.org/10.5753/ihc.2018.4219>.
2. Abreu, S., Silva, J. S. R., Anjos, G. P. D., Guedes, H. M. C., Prietch, S. S., Cardoso, P. C. F., Freire, A. P. (2019). Usability evaluation of a resource to read mathematical formulae in a screen reader for people with visual disabilities. In Proceedings of the 18th Brazilian Symposium on Human Factors in Computing Systems (pp. 1-11) (ABREU et al., 2019). Traz os resultados dos testes de usabilidade envolvendo o *plugin* ChromeVox-NavMatBR, além de resultados de implicações para o design de sistemas de leitura de fórmulas matemáticas utilizando software leitor de telas.
3. Anjos, G. P.; Abreu, S.; Guedes, H. M., Barbosa, A. A.; Prietch, S. S., Freire, A. P., Freire, E. R. C. Understanding the needs of visually impaired users in interactive systems for manipulating mathematical content in the interior of Brazil. (ANJOS et al., 2020) - em submissão. O artigo apresenta considerações sobre as necessidades dos usuários quanto à leitura matemática utilizando software de leitura de telas.
4. Guedes, H. M. C.; Cardoso, P. C. F.; Durelli, R. S.; Freire, A. P. Navigation in Digital Mathematical Formulae for Visually-Impaired Users: a Mapping of the Literature. New Review of Hypermedia and Multimedia. (em ajustes para segunda rodada de revisão).

Como contribuição profissional, o trabalho possibilitou ao autor a ampliação de sua visão com relação à Engenharia de Software, de modo especial à usabilidade e acessibilidade de sistemas. Além disso, por meio do programa ELAP (*Emerging Leaders in the Americas Program*), do governo Canadense, o autor deste trabalho teve a possibilidade de trabalhar juntamente à pesquisadores da Ontario Tech University - Oshawa, Ontario, Canadá em pesquisas envolvendo a utilização da robótica no auxílio de pessoas com deficiência visual. O trabalho foi feito sob a orientação do Prof. Patrick Hung.

A principal limitação do trabalho residiu na seleção de participantes e aplicação dos testes de usabilidade. Por tratar-se de testes a distância, devido ao isolamento social imposto pela pandemia do novo Coronavírus, só foi possível selecionar participantes com um grau elevado de experiência com leitores de tela. Além disso, uma vez que foi feita apenas a gravação de voz nos testes, dados importante como as expressões faciais dos participantes ao utilizarem o sistema não puderam ser analisadas. Desse modo, as análises se basearam apenas no que foi narrado pelo participante, a partir do protocolo *think aloud*, bem como em suas respostas quanto aos formulários aplicados.

Como trabalhos futuros, sugere-se a realização de estudos em escolas e outras instituições de ensino para verificar o impacto da utilização do *plugin* no ensino e aprendizagem da matemática com participantes de diferentes níveis de experiência com leitores de telas. Sugere-se ainda a realização das melhorias apresentadas na Seção 4.6.5, bem como a avaliação de seus resultados junto aos usuários em potencial. Além da aplicação das sugestões de melhorias, a partir da evolução da pesquisa sobre padrões de leitura de fórmulas matemáticas, desenvolvido por Lima et al. (2019), as formas de narração adotadas no Access8Math-NavMatBR poderiam ser revistas e adaptadas ao padrão identificado. Após a adaptação aos padrões de narração, conforme sugerido por um dos participantes do teste do Access8Math-NavMatBR, poderia ser criado um documento trazendo as regras utilizadas na narração. A criação deste documento não só poderia auxiliar a utilização do *plugin*, como teria a possibilidade de ser um auxílio pedagógico no ensino da matemática ao difundir o padrão de narração.

REFERÊNCIAS

- ABREU, S. et al. Usability evaluation of a resource to read mathematical formulae in a screen reader for people with visual disabilities. In: **Proceedings of the 18th Brazilian Symposium on Human Factors in Computing Systems**. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2019. (IHC '19). ISBN 9781450369718. Disponível em: <<https://doi.org/10.1145/3357155.3358480>>.
- AHMETOVIC, D. et al. Automatic tagging of formulae in pdf documents and assistive technologies for visually impaired people: The latex package axessibility 3.0. In: **ICCHP - Future Perspectives of AT, eAccessibility and eInclusion**. online: Springer, 2020. p. 69–73.
- ANJOS, G. P. d. et al. Understanding the needs of visually impaired users in interactive systems for manipulating mathematical content in the interior of brazil. **Journal of Educational Technology & Society**, International Forum of Educational Technology Society, 2020. Em submissão.
- BIER, A.; SROCZYŃSKI, Z. Adaptive math-to-speech interface. In: **Proceedings of the Multimedia, Interaction, Design and Innovation**. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2015. (MIDI '15). ISBN 9781450336017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1145/2814464.2814471>>.
- BOONPRAKONG, N. et al. Reading mathematical expression in thai. In: SINGAPORE THERAPEUTIC, ASSISTIVE & REHABILITATIVE TECHNOLOGIES (START) CENTRE. **Proceedings of the 11th International Convention on Rehabilitation Engineering and Assistive Technology**. Singapore, 2017. p. 9.
- BORODIN, Y. et al. More than meets the eye: a survey of screen-reader browsing strategies. In: ACM. **Proceedings of the 2010 International Cross Disciplinary Conference on Web Accessibility (W4A)**. Raleigh, NC, USA, 2010. p. 13.
- BOUCK, E. C.; WENG, P.-L. Hearing math: Algebra supported etext for students with visual impairments. **Assistive Technology**, Taylor & Francis, v. 26, n. 3, p. 131–139, 2014.
- BRAUN, V.; CLARKE, V. Using thematic analysis in psychology. **Qualitative research in psychology**, Taylor & Francis, v. 3, n. 2, p. 77–101, 2006.
- BRAY, T. et al. **Extensible Markup Language (XML) 1.0 (Fifth Edition)**. [S.l.], 2008. [Http://www.w3.org/TR/2008/REC-xml-20081126/](http://www.w3.org/TR/2008/REC-xml-20081126/).
- BROOKE, J. et al. Sus-a quick and dirty usability scale. **Usability evaluation in industry**, London–, v. 189, n. 194, p. 4–7, 1996.
- BRZOSTEK-PAWŁOWSKA, J.; RUBIN, M.; SALAMOŃCZYK, A. Enhancement of math content accessibility in epub3 educational publications. **New Review of Hypermedia and Multimedia**, Taylor Francis, v. 25, n. 1-2, p. 31–56, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/13614568.2019.1664645>>.
- CAHILL, H.; BOORMANS, G. **Problem analysis: A formative evaluation of the mathematical and computer access problems as experienced by visually impaired students**. 1994. Relatório Técnico Deliverable No. D I, Tide Maths project, Comissão Europeia.

CERVONE, D.; KRAUTZBERGER, P.; SORGE, V. Employing semantic analysis for enhanced accessibility features in mathjax. In: IEEE. **2016 13th IEEE Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC)**. Las Vegas, NV, USA, 2016. p. 1129–1134.

Comitê de Ajudas Técnicas. Tecnologia assistiva. **Brasília: CORDE**, Brasília, DF, Brasil, 2009.

COOK, A. M.; POLGAR, J. M. **Assistive Technologies-E-Book: Principles and Practice**. St. Louis, Missouri: Elsevier Health Sciences, 2014. 488 p. ISBN 032309631X.

DOUSH, I. A.; PONTELLI, E. Building a programmable architecture for non-visual navigation of mathematics: Using rules for guiding presentation and switching between modalities. In: SPRINGER. **International Conference on Universal Access in Human-Computer Interaction**. San Diego, California, USA, 2009. p. 3–13.

EDWARDS, A. D.; MCCARTNEY, H.; FOGAROLO, F. Lambda:: a multimodal approach to making mathematics accessible to blind students. In: ACM. **Proceedings of the 8th international ACM SIGACCESS conference on Computers and accessibility**. Portland, Oregon, USA, 2006. p. 48–54.

EDWARDS, A. D. N. Modelling blind users interactions with an auditory computer interface. **International Journal of Man-Machine Studies**, v. 30, n. 5, p. 575–589, 1989.

EICHOLZ, A. et al. **HTML 5.2 (W3C Recommendation)**. Cambridge, MA, 2017. Disponível online em <https://www.w3.org/TR/2017/REC-html52-20171214/>, último acesso em 12/01/2021.

ELKABANI, I.; ZANTOUT, R. A framework for helping the visually impaired learn and practice math. In: IEEE. **2015 5th International Conference on Information & Communication Technology and Accessibility (ICTA)**. Marrakech, Morocco, 2015. p. 1–5.

Everis Brasil. **Resultados da Pesquisa do Uso de Leitores de Tela**. São Paulo, SP, 2018. Disponível em <https://estudoinclusivo.com.br/pesquisa-ldt-2018/resultados>, último acesso em 12/01/2021.

FAJARDO-FLORES, S.; ARCHAMBAULT, D. Evaluation of a prototype of a multimodal interface to work with mathematics. **AMSE IFRATH**, v. 75, p. 106–118, 2014.

FERREIRA, H.; FREITAS, D. Audio rendering of mathematical formulae using mathml and audiomath. In: SPRINGER. **ERCIM Workshop on User Interfaces for All**. Berlin, Heidelberg, 2004. p. 391–399.

FERREIRA, H.; FREITAS, D. Enhancing the accessibility of mathematics for blind people: The audiomath project. In: SPRINGER. **International Conference on Computers for Handicapped Persons**. Berlin, Heidelberg, 2004. p. 678–685.

FERREIRA, H.; FREITAS, D. Audiomath: using mathml for speaking mathematics. In: **XATA05 - XML and Associated Technologies**. Braga, Portugal: Universidade do Minho, 2005.

FERREIRA, H.; FREITAS, D. Leitura de fórmulas matemáticas para cegos e amblíopes: A aplicação AudioMath. **IBERSCAP06**, p. 137–142, 2006.

FERRI, D.; FAVALLI, S. Web accessibility for people with disabilities in the european union: Paving the road to social inclusion. **Societies**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 8, n. 2, p. 40, 2018.

FRANKEL, L.; BROWNSTEIN, B.; SOIFFER, N. Navigable, customizable tts for algebra. In: **28th Annual International Technology and Persons with Disabilities Conference Scientific/Research Proceedings**. San Diego, CA: California State University, Northridge, 2014. p. 13–24.

GAURA, P. Remathex — reader and editor of the mathematical expressions for blind students. In: MIESENBERGER, K.; KLAUS, J.; ZAGLER, W. (Ed.). **Computers Helping People with Special Needs**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2002. p. 486–493. ISBN 978-3-540-45491-5.

GRUBER, M. et al. ARET-Automatic Reading of Educational Texts for Visually Impaired Students. In: **INTERSPEECH - Annual Conference of the International Speech Communication Association**. San Francisco, CA: ISCA, 2016. p. 383–384.

GULLEY, A. P. et al. Process-driven math: An auditory method of mathematics instruction and assessment for students who are blind or have low vision. **Journal of visual impairment & blindness**, SAGE Publications Sage CA: Los Angeles, CA, v. 111, n. 5, p. 465–471, 2017.

IBGE. **Censo Demográfico 2010: Características gerais da população, religião e pessoas com deficiência**. 2010. Disponível em <https://bit.ly/2ETAqXz>, último acesso em 02 de outubro de 2018.

ISO/IEC 40500:2012. **Information technology – W3C Web Content Accessibility Guidelines (WCAG) 2.0**. Geneva, Switzerland: ISO/IEC, 2012.

LEWIS, C. Using the 'thinking-aloud' method in cognitive interface design. **Research Report RC9265, IBM TJ Watson Research Center**, 1982.

LEWIS, C.; WHARTON, C. Chapter 30 - cognitive walkthroughs. In: HELANDER, M. G.; LANDAUER, T. K.; PRABHU, P. V. (Ed.). **Handbook of Human-Computer Interaction (Second Edition)**. Second edition. Amsterdam: North-Holland, 1997. p. 717 – 732. ISBN 978-0-444-81862-1. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780444818621500960>>.

LIMA, M. A. de et al. Análise de verbalizações de fórmulas matemáticas por professores com experiência no ensino de pessoas com deficiência visual/analysis of mathematical formulas verbalizations by teachers with experience in teaching visually impaired people. **Revista de Estudos da Linguagem**, v. 27, n. 3, p. 1371–1397, 2019.

MAĆKOWSKI, M. et al. Multimedia platform for mathematics' interactive learning accessible to blind people. **Multimedia Tools and Applications**, Springer, v. 77, n. 5, p. 6191–6208, 2018.

MANZOOR, A. et al. Alap: Accessible latex based mathematical document authoring and presentation. In: ACM. **Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems**. New York, NY, 2019. p. 504.

MATOUŠEK, J. et al. Web-based system for automatic reading of technical documents for vision impaired students. In: SPRINGER. **International Conference on Text, Speech and Dialogue**. Berlin, 2011. p. 364–371.

MEJÍA, P. et al. Casvi: A computer algebra system aimed at visually impaired people. In: SPRINGER. **International Conference on Computers Helping People with Special Needs**. Berlin, 2018. p. 573–578.

MINER, R. R.; ION, P. D. F.; CARLISLE, D. **Mathematical Markup Language (MathML) Version 3.0 2nd Edition**. Cambridge, MA, 2014. Disponível em <http://www.w3.org/TR/2014/REC-MathML3-20140410/>, último acesso em 12/01/2021.

MORENO, L. et al. Support resource based on standards for accessible e-government transactional services. **Computer Standards & Interfaces**, Elsevier, v. 58, p. 146–157, 2018.

National Council on Disability (US). **Study on the financing of assistive technology devices and services for individuals with disabilities: A report to the President and the Congress of the United States**. Washington, DC: National Council on Disability, 1993.

OMS. **UNITED NATIONS - DISABILITY**. 2011. Disponível em <https://www.un.org/development/desa/disabilities/issues.html>, último acesso em 02 de outubro de 2018.

PETERSEN, K. et al. Systematic mapping studies in software engineering. In: **Proceedings of the 12th International Conference on Evaluation and Assessment in Software Engineering**. Swindon, GBR: BCS Learning Development Ltd., 2008. v. 8, p. 68–77.

POWER, C. et al. Navigating, discovering and exploring the web: strategies used by people with print disabilities on interactive websites. In: SPRINGER. **IFIP Conference on Human-Computer Interaction**. Berlin, 2013. p. 667–684.

RAHMAN, M. F. Hierarchical manipulation of mathematical expressions for visually impaired students. In: **Proceedings of the 5th Winona Computer Science Undergraduate Research Symposium**. Winona, MN: Winona State University, 2005. p. 8–15.

RAMAN, T. **Audio system for technical readings**. 129 p. Tese (Doutorado) — Cornell University, Dept. of Computer Science., Ithaca, NY, USA, 1994.

ROGERS, Y.; SHARP, H.; PREECE, J. **Design de interação: além da interação humano-computador**. 3. ed. São Paulo, SP: Bookman, 2013. 65-99 p. ISBN 8582600089, 9788582600085.

SAHIB, N. G.; TOMBROS, A.; STOCKMAN, T. A comparative analysis of the information-seeking behavior of visually impaired and sighted searchers. **Journal of the American Society for Information Science and Technology**, Wiley Online Library, v. 63, n. 2, p. 377–391, 2012.

SALAMONCZYK, A.; BRZOSTEK-PAWLOWSKA, J. Translation of mathml formulas to polish text, example applications in teaching the blind. In: IEEE. **2015 IEEE 2nd International Conference on Cybernetics (CYBCONF)**. Gdynia, Poland, 2015. p. 240–244.

SAURO, J.; LEWIS, J. R. **Quantifying the user experience: Practical statistics for user research**. Waltham, MA: Morgan Kaufmann, 2016.

SILVA, L. F. da P. et al. Content-based navigation within mathematical formulae on the web for blind users and its impact on expected user effort. In: **ACM. Proceedings of the 8th International Conference on Software Development and Technologies for Enhancing Accessibility and Fighting Info-exclusion**. New York, NY, 2018. p. 23–32.

SILVA, L. F. da Paixão et al. How much effort is necessary for blind users to read web-based mathematical formulae?: A comparison using task models with different screen readers. In: **Proceedings of the XVI Brazilian Symposium on Human Factors in Computing Systems**. New York, NY, USA: ACM, 2017. (IHC 2017), p. 29:1–29:10. ISBN 978-1-4503-6377-8. Disponível em: <<http://doi.acm.org/10.1145/3160504.3160549>>.

SOIFFER, N. Mathplayer: Web-based math accessibility. In: **Proceedings of the 7th International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility**. New York, NY, USA: ACM, 2005. (Assets '05), p. 204–205. ISBN 1-59593-159-7.

SOIFFER, N. Mathplayer v2.1: Web-based math accessibility. In: **Proceedings of the 9th International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility**. New York, NY, USA: ACM, 2007. (Assets '07), p. 257–258. ISBN 978-1-59593-573-1.

SOIFFER, N. Browser-independent accessible math. In: **Proceedings of the 12th Web for All Conference**. New York, NY, USA: ACM, 2015. (W4A '15), p. 28:1–28:3. ISBN 978-1-4503-3342-9. Disponível em: <<http://doi.acm.org/10.1145/2745555.2746678>>.

SORGE, V. et al. Towards making mathematics a first class citizen in general screen readers. In: **Proceedings of the 11th Web for All Conference**. New York, NY, USA: ACM, 2014. (W4A '14), p. 40:1–40:10. ISBN 978-1-4503-2651-3.

STEVENS, R.; EDWARDS, A.; HARLING, P. Access to mathematics for visually disabled students through multimodal interaction. **Human-Computer Interaction**, v. 12, n. 1, p. 47–92, 1997.

SUTHERLAND, N. B. **Braille Display Device**. 1972. Patente número US3659354A.

SUZUKI, M. et al. An integrated ocr software for mathematical documents and its output with accessibility. In: SPRINGER. **International Conference on Computers for Handicapped Persons**. [S.l.], 2004. p. 648–655.

TSENG, W. **Access8Math**. [S.l.]: GitHub, 2018. Disponível em <https://github.com/tsengwoody/Access8Math>, último acesso em 25 de Novembro de 2020.

W3C. **Resultados preliminares Pesquisa sobre uso de Tecnologias Assistivas: Ampliadores e leitores de tela**. World Wide Web Consortium, 2012. Disponível em <http://accessibilidade.w3c.br/pesquisa/resultados-preliminares/>, último acesso em 12/01/2021. Disponível em: <<http://accessibilidade.w3c.br/pesquisa/resultados-preliminares/>>.

W3C Web Accessibility Initiative. **Web content accessibility guidelines (WCAG) 2.0**. 2008. Disponível em <http://www.w3.org/TR/WCAG20>, último acesso em 06 de junho de 2018.

WATANABE, T. Experimental evaluation of usability and accessibility of heading elements. In: **Proceedings of the 2007 International Cross-disciplinary Conference on Web Accessibility (W4A)**. New York, NY, USA: ACM, 2007. (W4A '07), p. 157–164. ISBN 1-59593-590-8. Disponível em: <<http://doi.acm.org/10.1145/1243441.1243473>>.

WATANABE, T. Experimental evaluation of usability and accessibility of heading elements. **Disability and Rehabilitation: Assistive Technology**, Taylor & Francis, v. 4, n. 4, p. 236–247, 2009.

WebAIM. **Web accessibility in mind survey**. 2017. Disponível em <http://www.webaim.org/projects/screenreadersurvey/>, último acesso em 12/01/2021.

WONGKIA, W.; NARUEDOMKUL, K.; CERCONI, N. Better access to math for visually impaired. In: IEEE. **2009 IEEE Toronto International Conference Science and Technology for Humanity (TIC-STH)**. Toronto, ON, Canada, 2009. p. 43–48.

WONGKIA, W.; NARUEDOMKUL, K.; CERCONI, N. i-math: Automatic math reader for thai blind and visually impaired students. **Computers & Mathematics with Applications**, Elsevier, v. 64, n. 6, p. 2128–2140, 2012.

YAMAGUCHI, K.; SUZUKI, M.; KANAHORI, T. Braille capability in accessible e-textbooks for math and science. In: MIESENBERGER, K. et al. (Ed.). **Computers Helping People with Special Needs**. Cham: Springer International Publishing, 2014. p. 557–563. ISBN 978-3-319-08596-8.

APÊNDICE A – Questionário SUS para avaliação da satisfação de uso da segunda versão do ChromeVox-NavMatBR

Formulário de Satisfação de uso da segunda versão do ChromeVox-NavMatBR

1) Eu acho que gostaria de usar esse sistema.

1 2 3 4 5

Discordo totalmente Concordo totalmente

2) Eu achei o sistema desnecessariamente complexo.

1 2 3 4 5

Discordo totalmente Concordo totalmente

3) Eu achei o sistema fácil de ser utilizado.

1 2 3 4 5

Discordo totalmente Concordo totalmente

4) Eu acho que precisaria de ajuda de uma pessoa com conhecimentos técnicos para usar o sistema.

1 2 3 4 5

Discordo totalmente Concordo totalmente

5) Eu acho que as várias funções do sistema foram bem integradas.

1 2 3 4 5

Discordo totalmente Concordo totalmente

6) Eu acho que existem várias inconsistências nesse sistema.

1 2 3 4 5

Discordo totalmente Concordo totalmente

7) Eu acredito que a maioria das pessoas poderiam aprender a utilizar esse sistema muito rapidamente.

1 2 3 4 5

Discordo totalmente Concordo totalmente

8) Eu achei o sistema muito difícil de usar.

1 2 3 4 5

Discordo totalmente Concordo totalmente

9) Eu me senti muito confiante usando o sistema.

1 2 3 4 5

Discordo totalmente Concordo totalmente

10) Eu precisei aprender muitas coisas antes que eu pudesse utilizar o sistema.

1 2 3 4 5

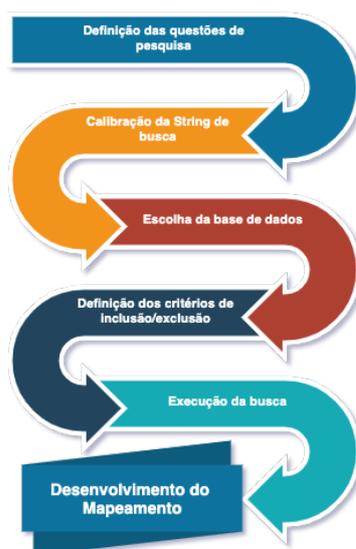
Discordo totalmente Concordo totalmente

APÊNDICE B – Mapeamento Sistemático - Análise de técnicas de navegação na literatura

.1 Protocolo utilizado

A execução do Mapeamento Sistemático foi baseada no protocolo estabelecido por Petersen et al. (2008) e contou com a aplicação de um conjunto de etapas compostas por: definição das questões de pesquisa; calibração da string de busca; escolha da base de dados; definição dos critérios de inclusão e exclusão de trabalhos; e por fim, execução do mapeamento. O fluxo utilizado está evidenciado por meio da Figura 1.

Figura 1 – Fluxo no desenvolvimento do Mapeamento Sistemático



Fonte: Do autor (2020)

.1.1 Questões de pesquisa

As questões de pesquisa estabelecidas pelo Mapeamento Sistemático foram derivadas a partir da constatação de que a leitura matemática não é uma tarefa trivial como a leitura de um texto simples. Além disso, como Borodin et al. (2010) e Wongkia, Naruedomkul e Cercone (2009) demonstraram, a leitura e manipulação de fórmulas matemáticas são influenciadas não somente por fatores matemáticos mas também por questões tecnológicas e culturais.

Tendo isso em mente, as seguintes questões de pesquisa foram elaboradas:

- Quais estratégias tem sido utilizadas na leitura e navegação em fórmulas matemáticas utilizando leitores de tela?
- Como os aspectos culturais e tecnológicos foram abordados para melhorar a interação do usuário?

Tendo em vista a obtenção das respostas para as questões primárias do estudo, algumas questões secundárias foram usadas na extração de dados dos artigos selecionados.

- Qual a estratégia de navegação usada nas leituras de fórmulas matemáticas?
- Como é o controle dos usuários sobre estas estratégias
- Quais as plataformas cobertas pelos estudos?
- A estratégia proposta utiliza leitura braille?
- A proposta do estudo é apenas a leitura da fórmula ou possui algum mecanismo de resolução?
- Quais os idiomas suportados?
- Como foi feita a derivação da leitura?

.1.2 String de busca e Base de dados

A string de busca foi definida de acordo com o escopo do estudo, incluindo expressões como *screen reader* (intervenção tecnológica), *Mathematics* (controle) e *blind* (população). A tabela 1 apresenta as palavras-chave utilizadas, bem como suas derivações e como cada um dos grupos de palavra-chave foram utilizados na string de busca final.

A busca dos trabalhos foi feita sobre as plataformas Scopus¹ e Web of Science². A escolha por essas plataformas se deu pelo fato de elas conterem em sua base de indexação os principais veículos de publicação da área de IHC (Interação Humano-Computador).

¹ Disponível em <https://www.scopus.com/>

² Disponível em <https://www.webofknowledge.com>

Tabela 1 – Composição da string de busca

Palavra-chave	Sinônimos	Escopo de busca
Screen Reader	screen?reader?, screen?reading, listening reading, text-to-speech, synthetic speech, speech synthesis, Speech generation	Título, <i>abstract</i> ou <i>keywords</i>
Math	math, mathematics, equation, formulae, formula, formulation, mathematical information, mathematical expression, mathematical expressions	Título, <i>abstract</i> ou <i>keywords</i>
Blind	blind, blind-user, non-visual, visual disability, visual impairment, visually?impaired, visually?disabled, low vision, partially?sighted	Corpo do texto

Fonte: Do autor (2020)

.1.3 Critérios de inclusão e exclusão

Os critérios de inclusão e exclusão foram aplicados para decidir quais estudos seriam incluídos no mapeamento sistemático, baseando-se no título, *abstract* e *keywords*, e posteriormente na leitura completa do texto. A Tabela 2 apresenta os critérios utilizados no escopo do mapeamento sistemático.

Tabela 2 – Lista de critérios de inclusão e exclusão usados na filtragem de documentos para esse mapeamento sistemático

Critérios de inclusão	Critérios de exclusão
Trabalhos apresentando técnicas de navegação em fórmulas matemática	Artigos que não abordam a leitura matemática
Trabalhos que apresentem comparações entre técnicas de navegação	Trabalhos lidando apenas com o tratamento de regras de prosódia
Estudos que apresentam ferramentas compostas por leitor de telas e/ou software de leitura em braille	Trabalhos que envolvem apenas leitura em braille, sem o auxílio do software de leitura de tela
	Artigos em idiomas diferentes do inglês

Fonte: Do autor (2020)

.1.4 Execução do protocolo de busca e seleção de trabalhos

A busca foi executada no dia 20 de junho de 2019. A Figura 2 apresenta o processo de execução e o número de trabalhos analisados em cada um dos estágios da execução.

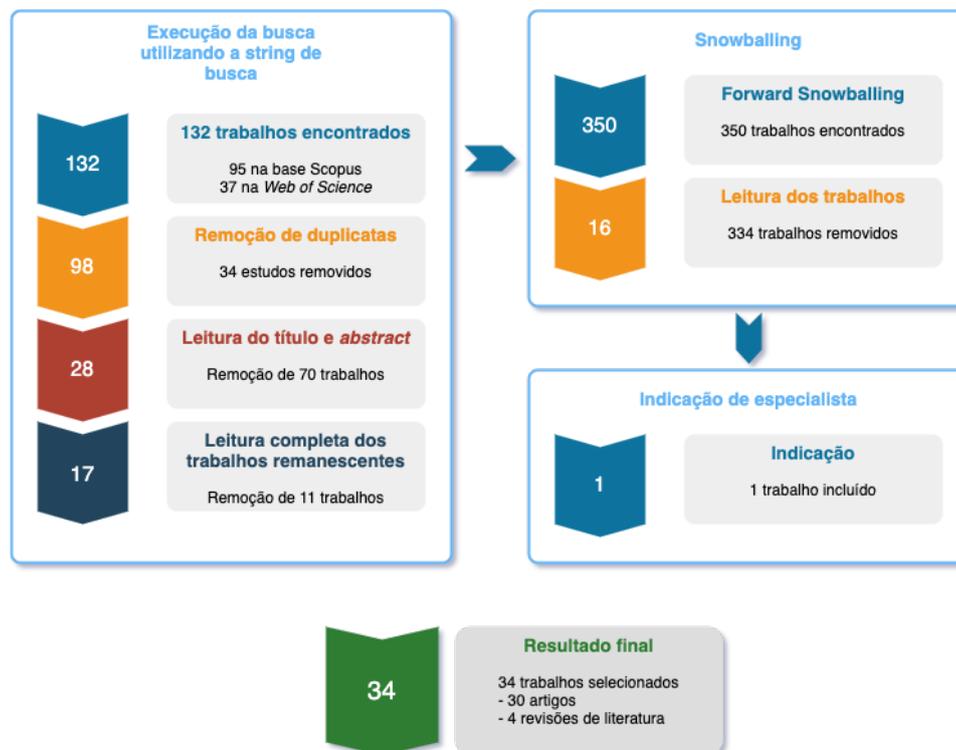
A execução da busca resultou na localização de 95 trabalhos na base de dados Scopus e outros 37 no *Web of Science*, totalizando 132 resultados, sendo que destes 34 eram resultados duplicados e foram removidos. Após essa remoção, os 98 trabalhos remanescentes foram submetidos a análise a partir dos critérios de inclusão e exclusão - aplicados primeiramente sobre o

título, *abstract* e *keywords*, e posteriormente através da leitura completa dos trabalhos. Depois da análise utilizando os critérios de inclusão e exclusão, 11 trabalhos foram removidos da lista final de artigos do mapeamento sistemático.

Como passo final, visando expandir o escopo da busca, um processo de *Forward Snowballing* foi executado, buscando incluir estudos citados pelos trabalhos já selecionados até o passo anterior. A execução do *Forward Snowballing* resultou na obtenção de 350 novos trabalhos para serem analisados. Com estes trabalhos em mãos, foi realizado o passo de aplicação dos critérios de inclusão e exclusão. A filtragem realizada pela aplicação desses critérios resultou na seleção final de 16 trabalhos para serem adicionados na lista final de estudos selecionados pelo mapeamento sistemático, incluindo 4 revisões bibliográficas. Além desses trabalhos, após uma análise de acordo com os critérios de inclusão e exclusão, o estudo apresentado por Gulley et al. (2017) foi incluído em razão da indicação de um especialista da área de acessibilidade.

Ao final da execução do protocolo de busca, foram obtidos 34 trabalhos³.

Figura 2 – Passo-a-passo da execução da busca



Fonte: Do autor (2020)

³ A lista de trabalhos selecionados e informações relevantes está disponível em <http://bit.ly/2MkFGe3>